

Kurzstudie | September 2019

Strom- und H₂-Bedarf für einen dekarbonisierten Verkehrssektor in Deutschland

*im Auftrag der
Greenpeace Energy eG*

*Frederic Rudolph, Frank Merten, Karin
Arnold, Clemens Schneider*

Herausgeber:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Autorenteam:

Dr. Frederic Rudolph, Frank Merten, Dr. Karin Arnold, Clemens Schneider
frederic.rudolph@wupperinst.org

Abstract

Diese Studie untersucht Notwendigkeiten und Möglichkeiten, Wasserstoff und Strom zu nutzen, um den Verkehrssektor in Deutschland perspektivisch zu dekarbonisieren. Basis der Untersuchung ist das *Dekarbonisierungsszenario* des Wuppertal Instituts (Rudolph et al. 2017), welches den Verkehrssektor Deutschlands unter der Maßgabe dekarbonisiert, dass Deutschland einen adäquaten Beitrag dazu leistet, den Klimawandel auf 1,5°C mittlere Temperaturerhöhung gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter zu begrenzen.

Das Dekarbonisierungsszenario nimmt eine ambitionierte Verkehrs- bzw. Mobilitätswende im Personen- und Güterverkehr an, um dieses Politikziel zu erreichen. Es zeichnet sich durch eine besonders effiziente Mobilität aus, indem es umfangreiche Vermeidungs- und Verlagerungsstrategien bzw. -maßnahmen vorsieht und dadurch der Energieverbrauch und in der Konsequenz die Nutzung (knapper) erneuerbarer Energien im Verkehrssektor besonders gering bleiben können. Dennoch werden selbst in diesem Klimaschutzszenario signifikante Mengen erneuerbaren Stroms für den Verkehrssektor benötigt.

Es findet eine möglichst „direkte Elektrifizierung“ statt, also ein Strombezug von batterie-elektrischen Pkw (BEV) aus dem Netz, sowie über Oberleitungen für die Schiene und für große Lkw auf Bundesautobahnen. Es ist aber auch eine „indirekte Elektrifizierung“ nötig, indem aus erneuerbarem Strom unter der Hinnahme von Wirkungsgradverlusten Wasserstoff (H₂) und als Folgeprodukt auch synthetische Kraftstoffe hergestellt werden. Diese strombasierten Produkte werden im Dekarbonisierungsszenario für große Pkw, Lkw, sowie den (internationalen) Flug- und Seeverkehr verwendet.

Die vorliegende Studie bestimmt zusätzlich das Lastprofil für eine ungesteuerte Ladung von Elektro-Pkw im Zieljahr. Die Berechnungen verdeutlichen, dass die Dekarbonisierung des Verkehrssektors in Zukunft sehr viel stärker mit dem Stromsystem wechselwirkt. Dabei sind bezogen auf eine Flexibilisierung die trade-offs zwischen Effizienz und Flexibilitätsgrad zu beachten. Die direkte Elektrifizierung z.B. mittels BEV, H₂-Hybride als auch Oberleitungs-Fahrzeugen ist aufgrund geringerer Umwandlungsverluste und höherer Antriebswirkungsgrade deutlich effizienter als Systeme und Antriebe, die strombasierte (PtX-) Kraftstoffe nutzen. Dagegen bieten letztere in der Regel einen größeren Umfang und Dauer für die Erbringung von Flexibilitäten. Ein Optimum wird daher einen geeigneten Mix aus allen Strategien beinhalten.

Es zeigt sich schließlich, dass das derzeitige politische Instrumentarium und Ambitionsniveau den Herausforderungen noch nicht ernsthaft und konsequent begegnet. Für Klimaschutz im Verkehr bedarf es neben einer drastischen Energieverbrauchs-senkung und einem beschleunigten Ausbau erneuerbarer Energien auch die Infrastruktur für Strom und strombasierte Produkte.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
Inhaltsverzeichnis	4
1 Hintergrund und Motivation	5
2 Verkehrsszenarien - Herausforderungen und Voraussetzungen zur Dekarbonisierung des deutschen Verkehrssektors	6
2.1 Dekarbonisierungsszenario – was bedeutet das?	6
2.2 Beschreibung des Szenariorahmens	8
2.3 Methodik	9
2.4 Einordnung und Vergleich mit anderen Verkehrsszenarien	10
3 Entwicklung des Verkehrssektors im Szenario und Vergleich mit aktuellen Trends	13
3.1 Personenverkehr	13
3.2 Güterverkehr	19
4 Ergebnisse	25
4.1 Bedarf an Energieträgern für den dekarbonisierten Verkehrssektor	25
4.2 Lastprofil für eine ungesteuerte Ladung von Elektro-Pkw im Zieljahr	27
5 Literaturverzeichnis	35

1 Hintergrund und Motivation

Die vorliegende Kurz-Expertise fokussiert auf die Notwendigkeiten und Möglichkeiten, Wasserstoff und Strom zu nutzen, um den Verkehrssektor in Deutschland perspektivisch zu dekarbonisieren. Im Übereinkommen von Paris 2015 (Paris Agreement) hat sich die UN-Staatengemeinschaft zum Ziel gesetzt, den globalen Temperaturanstieg im Vergleich zur vorindustriellen Zeit auf möglichst 1,5 Grad zu begrenzen. Berechnungen der einschlägigen Klimamodelle zufolge sollten die CO₂-Emissionen weltweit bis zur Jahrhundertmitte netto bei Null liegen, wenn der Temperaturanstieg auf dieses Niveau beschränkt werden soll (-45% in 2030 gegenüber 2010). Eine Begrenzung auf 2°C würde erfordern, dass dieses Ziel im Zeitraum 2065 bis 2080 zu erreichen wäre (-25% bis 2030, IPCC 2018).

In Deutschland wurden bereits nach der Wiedervereinigung politische Zielvorstellungen für den Verkehr formuliert und Reduktionspotenziale ausgewiesen. Allerdings wurde auch damals bereits darauf hingewiesen, dass substanzielle Veränderungen eine „komplette Kehrtwende in der Energie- und Verkehrspolitik“ benötigten (vgl. Jochem 1991, damals für -25% bis 2005 gegenüber 1987). Tatsächlich aber stagnieren die klimarelevanten Emissionen im deutschen Verkehrssektor: Im Jahr 1990 wurden 164 Mio. t CO₂e emittiert, im Jahr 2017 lagen sie mit 170,6 Mio. t sogar über dem Wert von 1990. Das derzeitige Sektorziel der Bundesregierung, welches unter der Maßgabe erarbeitet worden war, den Klimawandel auf im globalen Mittel unter 2°C zu begrenzen, liegt für 2030 bei 95-98 Mio. t CO₂e (BMU 2016).

Um mögliche Lösungswege aufzuzeigen, hat das Wuppertal Institut für diese Kurzstudie untersucht, mit welchen Maßnahmen die erforderliche Dekarbonisierung des deutschen Verkehrssektors gelingen kann und welcher Bedarf an erneuerbarem Strom und erneuerbaren Gasen dafür bei den verschiedenen Verkehrsträgern entsteht.

Die Kurzstudie basiert dabei auf einem Verkehrsszenario, welches das Wuppertal Institut im Jahr 2017 für Greenpeace Deutschland entworfen hatte. Darin wird der Sektor bis 2035 unter der Maßgabe dekarbonisiert, dass Deutschland einen sinnvollen Beitrag zur Erreichung des 1,5° Ziels leistet (Rudolph et al. 2017). Die vorliegende Kurzstudie fasst die getroffenen Annahmen und Ergebnisse zusammen, um auf den Bedarf an Energieträgern für die verschiedenen (zu dekarbonisierenden) Verkehrsmittel hinzuweisen und um zusätzlich das Lastprofil für eine ungesteuerte Ladung von Elektro-Pkw im Zieljahr zu benennen. Darüber hinaus werden die Ergebnisse mit aktuellen Trends und politischen Zielvorstellungen verglichen.

Im motorisierten Individualverkehr (MIV) ist es angeraten, elektrische Antriebe einzusetzen, und zwar zum einen schon aus Effizienzgründen, zum anderen, um erneuerbaren Strom zu nutzen. Diese Lösung ist aber nicht tragfähig für andere Mobilitätsanforderungen (wie die des internationalen Schiffs- und Flugverkehrs). Hier wird erneuerbarer Wasserstoff benötigt, direkt in der Brennstoffzelle oder aber nach weiterer Umwandlung zu synthetischem Kraftstoff. Welcher Wasserstoff-Bedarf für diese Verkehrsarten entsteht, wird in der vorliegenden Kurzstudie quantifiziert.

2 Verkehrsszenarien - Herausforderungen und Voraussetzungen zur Dekarbonisierung des deutschen Verkehrssektors

2.1 Dekarbonisierungsszenario – was bedeutet das?

Wie eingangs dargestellt, sind die Ziele hochgesteckt. Die genannten Minderungen im Verkehrssektor sind aber für die Zielerreichung von 1,5°C von wesentlicher Bedeutung.

Mit der Studie „Verkehrswende für Deutschland: Der Weg zu CO₂-freier Mobilität bis 2035“ hat das Wuppertal Institut im Jahr 2017 einen Weg aufgezeigt, wie die Dekarbonisierung des Verkehrssektors möglich gemacht werden kann (Rudolph et al. 2017). Dabei spielt die Ablösung fossil-basierter Kraftstoffe durch Elektromobilität, Wasserstoff sowie synthetische Kraftstoffe (PtX) eine erhebliche Rolle. Konkret sind weitere Dekarbonisierungs-Techniken für den Verkehr (auch ausführlicher beschrieben in Kapitel 3)

- Strom für den Pkw und das Kraftrad (motorisierter Individualverkehr, MIV) und für die Schiene,
- Wasserstoff in der Brennstoffzelle sowie als Hybrid im Pkw, sowie
- Strom mittels Oberleitung sowie Plug-In Hybrid für den Güterverkehr.

Dabei versteht sich im Sinne der Dekarbonisierung von selbst, dass *Strom* wie auch *Wasserstoff* im Verkehr immer *erneuerbarer* Strom bzw. Wasserstoff bedeutet – die Emissionsfreiheit der Primärenergie muss gewährleistet sein. Damit ist klar, dass die Erzeugungskapazitäten von erneuerbarem Strom in erheblichem Umfang gesteigert werden müssen, auch wenn das wiederum eigene Herausforderungen mit sich bringt, zum Beispiel hinsichtlich Akzeptanz.

Das Dekarbonisierungsszenario setzt technisch stark auf Elektromobilität und Wasserstoff, aber auch auf synthetische Kraftstoffe wie die so genannten PtL-Kraftstoffe. Es ist damit geeignet, den Bedarf an zusätzlichem erneuerbarem Strom für den Verkehrssektor aufzuzeigen – und daraus entsprechende Handlungserfordernisse abzuleiten.

Da die vorliegende Untersuchung sowie die zugrunde liegende Studie auf den Verkehrssektor fokussiert, wird das Vorhandensein dieser erneuerbaren Strom- und Wasserstoffquellen vorausgesetzt. Tiefergehende Untersuchungen zum Handlungsbedarf finden sich beispielsweise in Zimmer et al. (2016), Bergk et al. (2017) oder Gerbert et al. (2018). Die Herkunft des erneuerbaren Wasserstoffs und die dafür zu erwartenden Preise ermittelt die zu dieser Untersuchung komplementäre Kurzstudie von Energy Brainpool (Niggemeier et al. 2019).

Von mindestens ebenso großer Bedeutung wie das Vorhandensein von technischen Lösungen für emissionsfreie Antriebe und Kraftstoffe sind aber die vorgelagerten Effekte durch Vermeiden und Verlagern von Verkehrsaufwänden. Es ist nicht nur eine Elektrifizierung des Verkehrs mittels einer Stromwende, sondern eine umfassende Mobilitätswende notwendig; ein „weiter so“ kann nicht zum Erreichen ambitionierter Klimaschutzziele führen. Die gute Nachricht in diesem Zusammenhang ist, dass Verkehrsvermeidungs- und -verlagerungsmaßnahmen in der Lage sind, die aufzu-

bringenden Kosten für eine Dekarbonisierung deutlich zu verringern. Zudem haben sie volkswirtschaftlichen Nutzen im Vergleich zum „weiter so“ (Rudolph 2019).

Vorgelagerte Instrumente von Verkehrsvermeidung und -verlagerung bieten einen erheblichen Hebel zur Emissionsminderung, indem etwa geeignete Raumstrukturen und Infrastrukturen geschaffen und genutzt werden (z.B. „Stadt der kurzen Wege“). Damit einher geht eine Verhaltensänderung des mobilen Menschen, die zu einer relevanten Reduktion des Verkehrsaufkommens führt (Rudolph et al. 2017).

„Unter der Maßgabe, ambitionierte Klimaschutzziele zu erreichen und zugleich einen Beitrag zur deutschen Nachhaltigkeitsstrategie zu leisten, reichen inkrementelle (Anm.: schrittweise) Veränderungen nicht aus. Gefordert sind in allen Sektoren ein umfassender Paradigmenwechsel und mutige strukturelle Veränderungen. Die aktuelle Fokussierung der Energiewende in Deutschland auf eine reine Stromwende greift dabei deutlich zu kurz. Allein durch eine Elektrifizierung des motorisierten Verkehrs und der Wärmebereitstellung können die angestrebten Ziele nicht erreicht werden. (...) Diese Transformation einer „Mobilitätswende“ bedarf ambitionierter politischer Gestaltung.“ (Rudolph et al. 2017).

In den Daten (siehe dort, Abschnitt 2.4) wird das unter anderem daran sichtbar, dass im WI-Szenario der Fahraufwand im Vergleich zu anderen Studien deutlich zurückgeht, und zwar nicht nur im Güter-, sondern auch im Personenverkehr (zur Einordnung der Ergebnisse in den Kontext anderer Studien siehe auch Abschnitt 0).

Das Maßnahmenbündel, das geschnürt wird, um den Verkehr zu dekarbonisieren, umfasst weitreichende Veränderungen in den Handlungsfeldern:

- Verkehrssparsame Raumstrukturen
- Digitalisierung, Vernetzung und Sharing
- Stärkung und Ausbau des Angebots im Umweltverbund (Infrastruktur)
- Steuerung des motorisierten Individualverkehrs (im Sinne von Restriktion und Reduktion)
- Fahrzeugeffizienz, Antriebe und Kraftstoffe
- Dekarbonisierung des Güterverkehrs

Diese Veränderungen werden nicht als Selbstläufer umgesetzt werden, auch wenn durch eine konsequente Umsetzung eine insgesamt höhere Lebensqualität erreicht würde; so z.B. eine bessere Luftqualität in den Städten, weniger Zeitaufwand für die Erledigung von Alltagsgeschäften durch die „Stadt der kurzen Wege“, bessere Anbindung des ländlichen Raums durch den Umweltverbund etc. (z.B. Lah & Lah 2019).

Die Automobilindustrie hat sich in der Vergangenheit nicht als Treiber für zunehmend energieeffiziente und klimafreundliche Pkw positioniert. Erst in der jüngeren Vergangenheit wird eine Veränderung der Produktpalette hin zu mehr Elektromobilität forciert.

Daher muss die Politik auch unter Zuhilfenahme von (scheinbar) unpopulären Maßnahmen (etwa die Verteuerung individueller Mobilität) entschlossen in diese Richtung steuern. Ein dekarbonisierter Verkehrssektor ist ein ambitioniertes Ziel, das entsprechend konsequent anzugehen ist.

2.2 Beschreibung des Szenariorahmens

Der deutsche Verkehrssektor kann bis 2035 treibhausgasneutral gestaltet werden. Zur Abbildung der Möglichkeiten und ihrer Resultate wird das Instrument der Szenarienbildung genutzt, bei dem die Entwicklung von exogenen Größen (wie Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung) mit einer erwartbaren Entwicklung von Nachfrage (nach Energie, Verkehrsleistung, etc.) sowie der Verfügbarkeit von Technologien und Energieträgern gekoppelt wird.

Szenarien dienen der Darstellung und der vergleichenden Bewertung von verschiedenen Zukunftsbildern. Wichtig ist die Unterscheidung von Szenario und Prognose: Eine Prognose sagt voraus, was voraussichtlich geschehen wird. Dagegen bildet ein Szenario die voraussichtlichen Folgen bestimmter Richtungsentscheidungen und damit mögliche Zukunftsoptionen ab.

Das im vorliegenden Papier beschriebene Dekarbonisierungsszenario ist ein normatives Szenario: Es gibt ein definiertes Ziel vor (hier: treibhausgasneutraler Verkehrssektor in 2035) und setzt die dafür notwendigen Komponenten (hier: Verkehrsvermeidung, alternative Kraftstoffe und Antriebe) in geeigneter Form zusammen, so dass das Ziel erreicht werden kann.

Normative Szenarien können daher als „wenn ... dann....“ Geschichten beschrieben werden: „Wenn das Ziel von 95 % Treibhausgasminderung erreicht werden soll, dann muss auch der Verkehrssektor seinen Beitrag leisten. - Wenn der Verkehrssektor bis 2035 treibhausgasneutral sein soll, dann ist PtL ein relevanter Kraftstoff gerade für den Güterverkehr.“

Der räumliche Bezug ist Deutschland; für die Ermittlung der Kraftstoffbedarfe wird der territoriale Ansatz gewählt, wie es auch in den relevanten Statistiken (etwa: „Verkehr in Zahlen“, DIW 2017) der Fall ist. Das bedeutet, dass die im Land getankten Mengen zur Anrechnung gebracht werden, unabhängig davon, ob der Weg über die Landesgrenze hinausführt.

Für den zeitlichen Bezug ist in Anlehnung an das Dekarbonisierungsszenario ein mittelfristiger Ausblick gewählt worden. Dabei ist im Sinne eines normativen Szenarios die Jahreszahl nicht absolut zu sehen, sondern als ein Punkt auf einem Dekarbonisierungspfad (gleichwohl aber nötig zur Erreichung des 1,5°C-Ziels). Wird ein solcher Pfad nicht eingeschlagen, werden auch die beschriebenen Effekte sich nicht in dem notwendigen Ausmaß in 2035 erkennen lassen.

2.3 Methodik

Die parametrisierte Modellierung des Dekarbonisierungsszenarios erfolgte quantitativ gestützt im Rahmen der Energiesystemmodellierung des Wuppertal Instituts. Der Verkehrssektor ist darin technologie- und anwendungsscharf abgebildet, indem Personen- und Tonnenkilometer auf verschiedene Verkehrsträger sowie Fahrzeugarten und Größenklassen verteilt sind. Diese lassen sich zu dem Gesamtenergiebedarf zusammenführen und, gekoppelt mit den spezifischen Kennwerten der jeweiligen Energieträger, können die resultierenden Treibhausgasemissionen bestimmt werden.

Für den Personenverkehr gibt es drei Module, die unterschiedlich gekoppelt werden können, um spezifische Strategien bzw. Energiebedarfe zu untersuchen (Rudolph et al. 2017):

- ein Mobilitätsmodul mit spezifischen Mobilitätskennzahlen zur Ableitung (bottom-up) des zukünftigen Verkehrsaufwands im Personenverkehr;
- ein Flottenmodul zur Modellierung der zukünftigen Zusammensetzung der Pkw-Flotte nach Haltergruppen;
- eine Technologiematrix für Fahrzeuge zur Abbildung technologischer Entwicklungen.

Die gesamten Endenergiebedarfe wurden im Energiesystemmodell mit Hilfe einer Technologiematrix für das Szenariojahr 2035 bestimmt.

Für den Güterverkehr wurden zunächst Ist-Daten des Statistischen Bundesamtes zu Verkehrsaufwand (in Tonnenkilometern sowie in Fahrzeugkilometern), Modal Split und Verteilung des Straßengüterverkehrs auf verschiedene Lkw-Größenklassen als Grundlage der Status-Quo-Analyse verwendet (ebd.).

Die Entwicklung von Dekarbonisierungsoptionen basiert auf den Ergebnissen vorliegender Szenariostudien (vgl. Zimmer et al. 2016) sowie Potenzialanalysen zu Fahrzeugtechnologien (vgl. Hülsmann et al. 2014).

Zu den Verkehrsaufwänden und dem Modal Split im Güterverkehr sind eigene Annahmen getroffen worden, die ambitionierteren Maßnahmen (insbesondere starke Mauterhöhung sowie Ausbau der Schieneninfrastruktur) entsprechen und deren Wirkungen zum Teil ebenfalls in anderen Szenariostudien modelliert wurden (vgl. DLR et al. 2016). Weitere Details zur Rahmenumgebung sowie zur Modellierung sind der WI-Dekarbonisierungsstudie zu entnehmen.

Zwei Sektoren werden von deren Dekarbonisierungsszenario nicht vollständig abgedeckt: das sind die internationalen Verkehrsleistungen im Flugverkehr sowie in der Seeschifffahrt. Diese Bereiche sind aber für die Erhebung des PtL-Bedarfs von Bedeutung und werden daher an dieser Stelle berücksichtigt.

Die Bedarfe werden aus den Daten für den EU-weiten Bedarf an Kraftstoffen aus dem „beyond 2°C Szenario“ (B2DS) der IEA (2017) extrahiert. Mit diesem Szenario legt die Internationale Energie Agentur ein ambitioniertes Klimaschutz-Szenario vor, in welchem der Energiesektor bis 2060 treibhausgasneutral gestellt wird. Das Ambitionsniveau ist damit hoch genug, dass dieses IEA-Szenario geeignet ist, um das ebenfalls ambitionierte WI-Dekarbonisierungsszenario nach Rudolph et al. (2017) zu ergänzen.

Konsequenterweise nimmt der Luftverkehr der EU von rund 560 TWh in 2014 (annähernd IST von 2015) bis 2035 als Zieljahr des vorliegenden IEA-Papers auf rund 415 TWh um rund 25 % ab. Dabei handelt es sich nur um den Personen-Flugverkehr; Frachtflüge finden nicht mehr statt bzw. sind auf Schiff oder Schiene verlagert.

Aber auch in der internationalen Schifffahrt wird der Kraftstoffbedarf reduziert; allerdings weniger stark von 459 TWh in 2014 auf 389 TWh in 2035 (IEA 2017).

Um die Daten für die vorliegende Untersuchung verfügbar zu machen, ist angenommen worden, dass die Anteile Deutschlands am EU-weiten Flug- bzw. Schiffsverkehr auch im Ausblick konstant bleiben. Diese sind nach DIW (2017) zu 19% am Flugverkehr und rund 7% am Schiffsverkehr berechnet worden. Abgezogen ist der derzeitige Anteil des innerdeutschen Flugverkehrs, der im Dekarbonisierungsszenario auf die Schiene verlagert ist (siehe Abschnitt 3.1 zum Flugverkehr).

2.4 Einordnung und Vergleich mit anderen Verkehrsszenarien

Das Instrument der Langfrist-Energieszenarien ist etabliert und wird von vielen Institutionen genutzt. Dementsprechend gibt es eine Vielzahl von Methoden und Studien zur Auswertung dieser Szenarien, die einen unterschiedlichen Fokus auf die Sektoren (Strom, Verkehr, übergreifend) legen.

Für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors sehen alle Szenarien bzw. mögliche Entwicklungspfade im Personen- wie im Güterverkehr grundsätzlich eine Kombination von Verkehrsaufwandsbegrenzung (der Personenkilometer, Pkm bzw. der Tonnenkilometer, tkm), einer Abkehr von den emissionsintensiven Verkehrsträgern (Pkw, Lkw, Flugzeug) und einen Technologiewandel vor (Vermeidung, Verlagerung, Verbesserung).

Wird eine vollständige oder nahezu vollständige Dekarbonisierung angestrebt, erfolgt diese meist im langfristigen Ausblick bis 2050 und einer 2°-Ambition, etwa wie bei Gerbert et al. 2018 (BCG&Prognos). Das Dekarbonisierungsszenario 2035 des Wuppertal Instituts ist insofern eine Ausnahme, da es unter Einhaltung des 1,5°-Pfads eine vollständige Dekarbonisierung bis 2035 vorsieht.

Abbildung 2-1 zeigt die Personenverkehrsaufwände verschiedener Szenariostudien für Deutschland mit Zielhorizont 2030-2050, ganz links zum Stand 2015 (also das IST zum Vergleich). Ganz rechts dargestellt ist das Dekarbonisierungsszenario 2035 des Wuppertal Instituts (Rudolph et al. 2017), welches gegenüber dem IST eine deutliche Reduktion des Verkehrsaufwands, sowie eine Verlagerung weg vom MIV und hin zum öffentlichen und nicht-motorisierten Verkehr vornimmt.

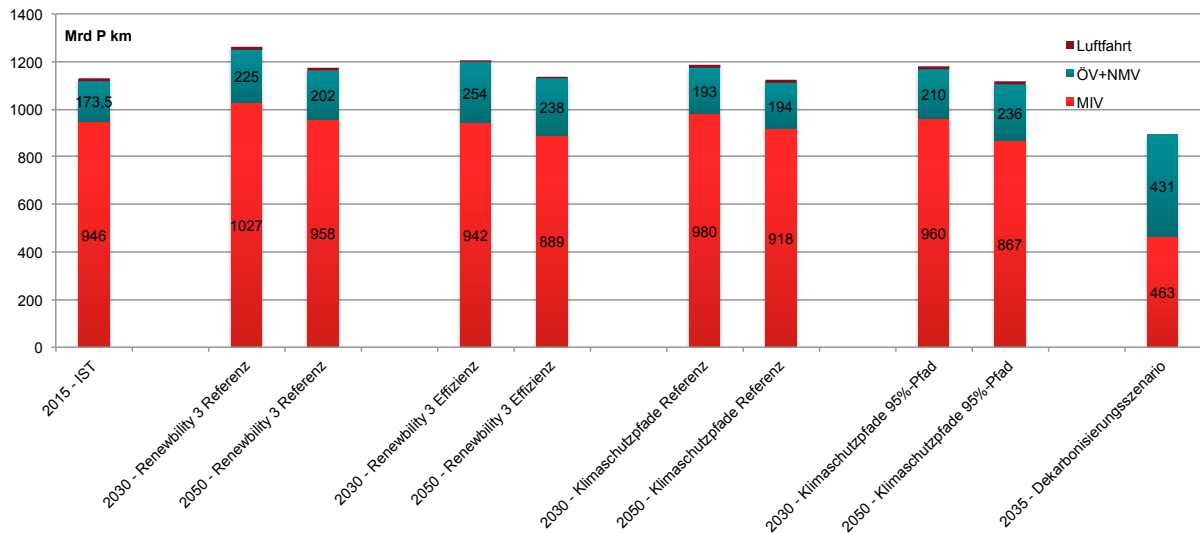


Abbildung 2-1: Personenverkehrsaufwände und Verkehrsträgeranteile verschiedener Szenariostudien [Mrd. Pkm]. Quelle: eigene Zusammenstellung folgender Studien:
IST: DIW 2017 (Verkehr in Zahlen)
Renewability 3: Zimmer et al. 2016 (Öko-Institut, DLR, ifeu, INFRAS)
Klimaschutzpfade: Gerbert et al. 2018 (BCG, Prognos)
Dekarbonisierungsszenario: Rudolph et al. 2017 (Wuppertal Institut)

Die vier anderen dargestellten Szenarien finden sich in „Renewability 3“ (Zimmer et al. 2016) und den „Klimaschutzpfaden“ (Gerbert et al. 2018). Sie sehen alle eine leichte Erhöhung des Verkehrsaufwands bis 2030 vor, um diesen dann bis 2050 wieder leicht zu senken. Die Niveaus von 2050 unterscheiden sich dabei nur in Nuancen vom IST 2015. Die (annähernden) Dekarbonisierungsvarianten „Effizienz“ und „95%-Pfad“ sehen für das Jahr 2050 gegenüber dem Stand von 2015 zusätzlich eine Verkehrsverlagerung vor.

Abbildung 2-2 zeigt das IST 2015 und dieselben Szenarien in der gleichen Reihenfolge für den Güterverkehr. Auch im Güterverkehr stellt sich das Dekarbonisierungsszenario des Wuppertal Instituts im Vergleich zu den anderen vier dargestellten möglichen Zukunftspfaden als außerordentlich ambitionierte Variante heraus, nämlich mit einem vergleichsweise geringen Güterverkehrswachstum und einer deutlichen Verlagerung von Straße hin zu Schiene und Schiff.

Die vier Vergleichsszenarien rechnen mit deutlichem Güterverkehrswachstum über 2030 hinaus. Nur der „95%-Pfad“ der „Klimaschutzpfade“ nimmt eine deutliche Verlagerung von Straße zu Schiene und Binnenschifffahrt an.

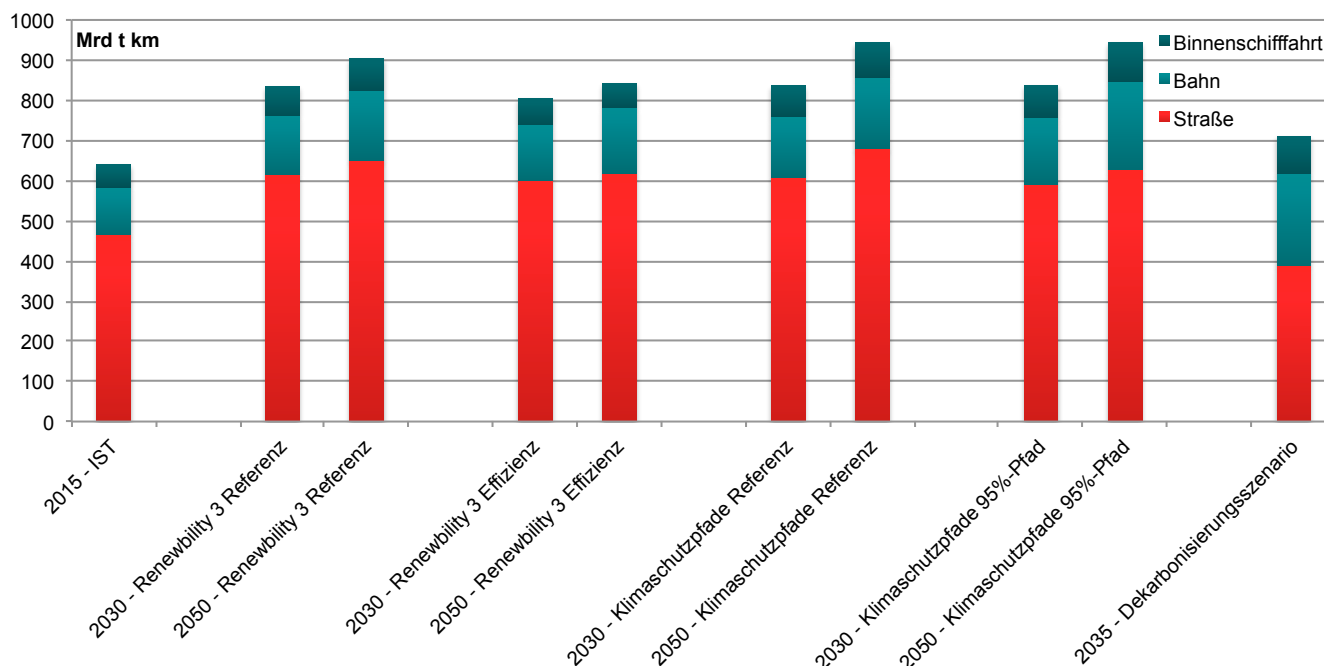


Abbildung 2-2: Güterverkehrsaufwände und Verkehrsträgeranteile verschiedener Szenariostudien [Mrd. tkm]. Quelle:
eigene Zusammenstellung folgender Studien:

IST: DIW 2017 (Verkehr in Zahlen)

Renewability 3: Zimmer et al. 2016 (Öko-Institut, DLR, ifeu, INFRAS)

Klimaschutzpfade: Gerbert et al. 2018 (BCG, Prognos)

Dekarbonisierungsszenario: Rudolph et al. 2017 (Wuppertal Institut)

Es zeigt sich, dass die Verkehrs- und Mobilitätswende als Kombination von technischen Optionen und den Effekten aus Verlagern und Vermeiden derzeit von keiner anderen Studie so konsequent gedacht werden wie im Dekarbonisierungsszenario des Wuppertal Instituts für Greenpeace Deutschland.

Die Rolle von Wasserstoff und PtX

Bedarf an Wasserstoff und PtX ist in allen Szenarien gegeben, obwohl darin unterschiedliche Reduktionspfade beschritten werden. Unterschiede in der Menge ergeben sich natürlich dennoch – und zwar über die Zeitpunkte und über das Verhältnis H_2 zu anderen PtX-Varianten. Das Dekarbonisierungsszenario des Wuppertal Instituts gehört insgesamt zu denjenigen mit geringerem Bedarf an beidem wegen der umfangreichen Verlagerungsmaßnahmen und des hohen Anteils direkter Elektrifizierung. Durch die frühe Dekarbonisierung des gesamten Sektors bereits in 2035 werden allerdings auch früh signifikant hohe Mengen an strombasierten Kraftstoffen nachgefragt (siehe hierzu auch Rudolph 2019). Das Dekarbonisierungsszenario setzt zudem auf hohe H_2 -Anteile (etwa über H_2 -Brennstoffzellenfahrzeuge) im Vergleich zur Nutzung synthetischer Kraftstoffe, da hier der Wirkungsgrad besser ist und damit die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien verhältnismäßig gering bleiben kann.

3 Entwicklung des Verkehrssektors im Szenario und Vergleich mit aktuellen Trends

In den folgenden Abschnitten wird die Entwicklung von Mobilität und Verkehr in Deutschland bis 2035 wie im Dekarbonisierungsszenario angenommen zusammengefasst und die dafür wichtigsten Instrumentengruppen bzw. Maßnahmenbündel aufgezählt. Dies wird mit den aktuellen politischen Ambitionen verglichen.

3.1 Personenverkehr

Wie Abbildung 2-1 (S. 11) zeigt, geht der Personenverkehrsaufwand im Dekarbonisierungsszenario von 1.130 Milliarden Pkm im Jahr 2015 auf 894 Milliarden Pkm deutlich zurück und es findet eine Verlagerung zu den Verkehrsträgern des Umweltverbundes statt.

Motorisierter Individualverkehr (MIV)

Im motorisierten Individualverkehr werden in Deutschland derzeit sowohl die meisten Personen befördert als auch die weitesten Strecken zurückgelegt. Trotz Stärkung des Umweltverbunds (siehe nächster Abschnitt) bleibt die Bedeutung des MIV auch im Dekarbonisierungsszenario erhalten.

Technisch ist vor allem der – möglichst direkte – Einsatz von Strom als Kraftstoff die bevorzugte Option, da sie den besten Wirkungsgrad und die höchste Effizienz aufweist (z.B. Agora Verkehrswende 2017). Im Sinne einer weitgehend gelungenen Mobilitätswende verschiebt sich die Zusammensetzung der Pkw-Flotte hin zu kleineren Fahrzeugen (siehe Abbildung 3-1): während das Segment der mittelgroßen Pkw derzeit noch die Mehrheit der Fahrzeuge (mit 52 % in 2018) stellt und immerhin rund ein Fünftel der Fahrzeuge große Pkw sind, verbleiben in 2035 auf dem Dekarbonisierungspfad nur noch ca. neun Prozent große Fahrzeuge.¹

Hier zeigt sich, dass eine Teilstrategie für die Dekarbonisierung des Verkehrs der Einsatz möglichst kleiner Fahrzeuge ist, um möglichst wenig Energie zu verbrauchen. Da das Potenzial erneuerbarer Energien in Deutschland beschränkt ist und der Ausbau Zeit kostet, ist ein sparsamer Umgang mit den Ressourcen notwendig. Durch die Verkleinerung der Pkw-Größen wird aber nicht nur Energiebedarf reduziert, sondern beim MIV auch die direkte Elektrifizierung der Fahrzeugflotte über batterie-elektrische Pkw mit hohem Wirkungsgrad ermöglicht.

Schließlich macht Abbildung 3-1 deutlich, dass im Dekarbonisierungsszenario nicht nur die Pkw im Durchschnitt kleiner werden, sondern auch die Flotte insgesamt schrumpft. Dies läuft dem bisherigen Trend signifikant entgegen, denn in der Vergangenheit gab es erstens einen Trend hin zu größeren Pkw, hauptsächlich getrieben durch den Trend zu Geländewagen bzw. Sports Utility Vehicles (SUVs). Zweitens nimmt auch die Pkw-Flotte in Deutschland stetig zu: Waren 2008 noch 41 Mio. Pkw

¹ Als kleine Pkw zählen hier die Segmente Mini und Kleinwagen, als mittelgroße Pkw zählen die Segmente Kompaktklasse, Mittelklasse, Sports Utility Vehicle (SUV), Sportwagen und Mini-Van, als große Pkw zählen die Segmente Obere Mittelklasse, Oberklasse, Geländewagen, Großraum-Vans, Utilities, Wohnwagen und Sonstiges.

beim Kraftfahrtbundesamt registriert, wuchs die Flotte bis 2018 auf bereits 47 Millionen.

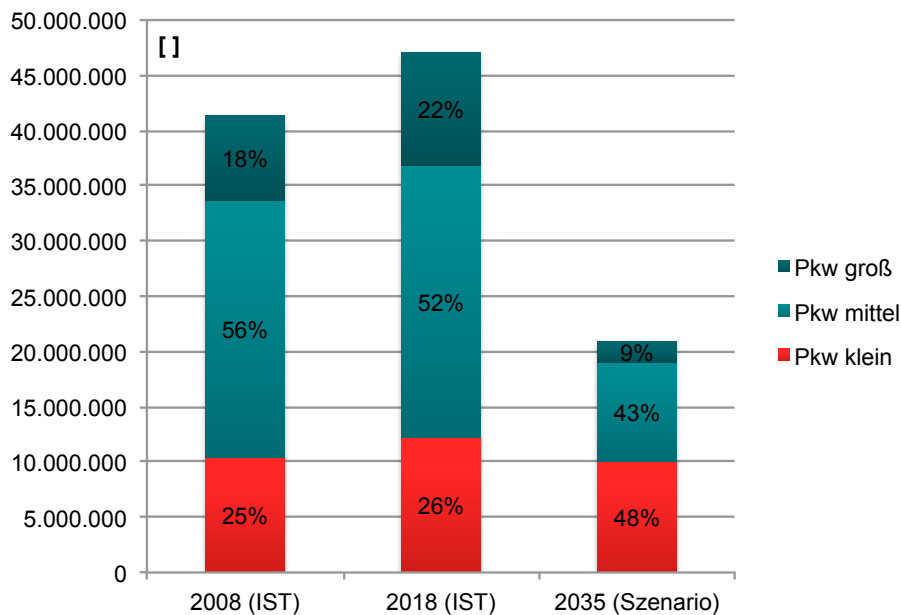


Abbildung 3-1: Anzahl und Anteil der Pkw-Segmente in der Bestandsflotte, Vergleich von 2008 und 2018 mit 2035 (Dekarbonisierungspfad). Quellen: Website KBA, Rudolph et al. 2017

Wie in Abbildung 3-2 illustriert, wird der Großteil der Flotte über alle Segmente direkt elektrifiziert. Bei den mittelgroßen und großen Fahrzeugen spielen die Brennstoffzelle sowie der H₂-Hybrid (als indirekte Elektrifizierung) eine größere Rolle als bei den kleinen Fahrzeugen. Auch im Dekarbonisierungsszenario sind in 2035 noch rund zwei Prozent Verbrennungsmotoren in der Flotte vorhanden; dabei handelt es sich um Oldtimer mit geringer jährlicher Laufleistung.

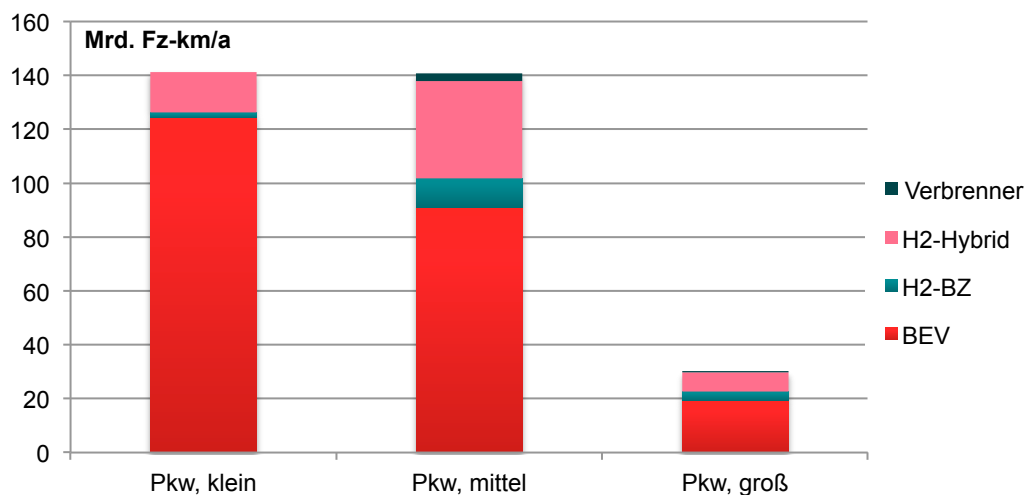


Abbildung 3-2: Zusammensetzung der Pkw-Flotte nach Antriebsart im Jahr 2035 auf dem Dekarbonisierungspfad. Quelle: Rudolph et al. 2017

Politikinstrumente und Optionen für die Zukunft

Eine Forcierung von Fahrzeugeffizienz gestalten Staaten aller Weltregionen schon länger über Standards (Atabani et al. 2011). Die EU verfügt über eine Flottenemissionsnorm mit Zielvorgabe 95 g CO₂ pro km im Durchschnitt aller Mitgliedsstaaten und Hersteller für 2021. Die Zielvorgaben sind für die Hersteller erreichbar durch eine Kombination von Fahrzeugeffizienz, durchschnittlich kleineren Fahrzeugen und Antriebswechsel.²

Wie Abbildung 3-3 zeigt, sanken die mittleren Pkw-Emissionen der Pkw-Neuwagenflotte im Zeitraum 2008 bis 2016, seitdem steigt der Durchschnitt aber wieder leicht auf 130 g in 2018. Zudem liegt Deutschland deutlich über dem EU-Durchschnitt von 120 g im Jahr 2018. In Deutschland wird über die Dienstwagenbesteuerung der Kauf großer Dienstwagen bevorteilt, besonders größere Fahrzeuge werden in der Regel als Dienstwagen in Umlauf gebracht und gehen später als Gebrauchtwagen in die Privatflotte über. Sollte die Politik weiterhin den Verkauf größerer Pkw unterstützen wollen, kämen als dekarbonisierte Variante Brennstoffzellenfahrzeuge in Frage.

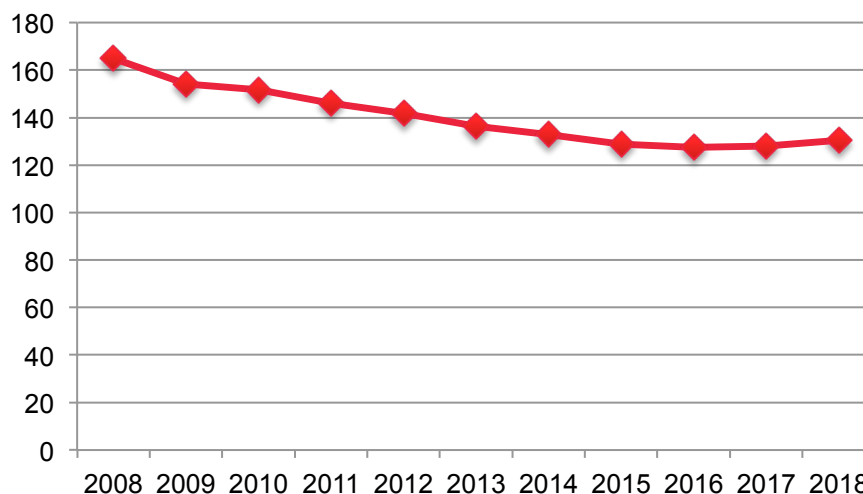


Abbildung 3-3: Spezifische Emissionen der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland [g CO₂/km].

Quelle: Website KBA

Eine Verschärfung der derzeitigen Besteuerung in Deutschland ist nicht in Sicht. Das Dekarbonisierungsszenario schlägt zu Erreichung der ambitionierten Zielvorgaben insbesondere folgende Maßnahmen vor (Rudolph et al. 2017):

- Eine Zulassungssteuer für Pkw nach dem Vorbild anderer Länder Europas.
- Eine schrittweise Weiterentwicklung der Kfz-Steuer: Zunächst erfolgt eine starke, dynamische Erhöhung auf Basis von CO₂-Emissionen und Schadstoffklassen; Gewicht und Größe werden irrelevant. Ab 2025 richtet sich die neue Pkw-Umlaufsteuer nach dem Energieverbrauch des Wagens, während CO₂-Emissionen keine Rolle mehr spielen.
- Zudem werden – in der Phase bis 2025 – fossile Kraftstoffe verteuert.

² Die Ermittlung der Emissionen eines Pkw geschieht auf Basis eines Labortests bei der Typengenehmigung, der nicht dem tatsächlichen Verbrauch auf der Straße entspricht. Mehr Informationen dazu liefern Damert und Rudolph (2018).

- Eine distanzbasierte Pkw-Maut für alle Straßen im Verantwortungsbereich des Bundes und der Länder. Denkbar sind hier unterschiedlich hohe Entgelte in Agglomerationen im Vergleich zu dünner besiedelten Gebieten, um sozialen Ausgleich zu schaffen.

Öffentlicher Personenverkehr

In Ballungsräumen stellt der öffentliche Verkehr ein Rückgrat der Personenmobilität dar. In wachsenden Städten wie beispielsweise Berlin, Köln, Stuttgart oder Düsseldorf stößt er in Teilen an die Grenzen seiner Kapazität. Gleichzeitig wird bundesweit der Investitions- und Modernisierungsbedarf thematisiert (vgl. Hans Böckler Stiftung 2015). Anders stellt sich die Situation in vielen ländlichen Regionen dar, in denen der demografische Wandel zu einem Bevölkerungsrückgang und vor allem zu einem Sinken der Schülerzahlen führt, welche die Wirtschaftlichkeit des ÖPNV mitbestimmen. Jedoch hält die Mittelausstattung insgesamt nicht Schritt mit den Wachstumsperspektiven und dem Anspruch an einen qualitativ hochwertigen ÖPNV, es fehlen zukunftsorientierte Finanzierungsmodelle (vgl. VDV 2016).

Der Anteil des öffentlichen Verkehrs nimmt im Dekarbonisierungsszenario von derzeit rund acht Prozent auf insgesamt 19 % der Wege zu. Dabei liegt der Anteil im städtischen Raum aufgrund des dichteren Angebots bei 24 %, auf dem Land werden zwölf Prozent erreicht (vgl. Rudolph et al. 2017). Für längere Strecken wird der Verkehr noch weiter auf die Schienen verlagert; zudem kommen Fernbusse zum Einsatz.

Der Schienenverkehr ist im Szenario unterteilt in:

- den öffentlichen Schienen-Personenverkehr (ÖSPV), dies sind Straßen- und U-Bahnen;
- den Schienen-Personen-Nahverkehr (SPNV), also S- und Regionalbahnen und
- den Schienen-Personen-Fernverkehr (SPFV), Fernzüge (etwa IC und ICE).

Im Dekarbonisierungsszenario wird die vollständige Elektrifizierung des Schienenverkehrs angenommen, sodass die aufgeführte Unterscheidung für den Energiebedarf nicht relevant ist. Sollte dies nicht erfolgen, steigt entsprechend der Bedarf an erneuerbarem Wasserstoff, was hier aber nicht modelliert wurde. Ein Teil der Fernbusse fährt ebenfalls elektrisch, während der überwiegende Teil aber mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb betrieben wird (siehe Abbildung 3-4).

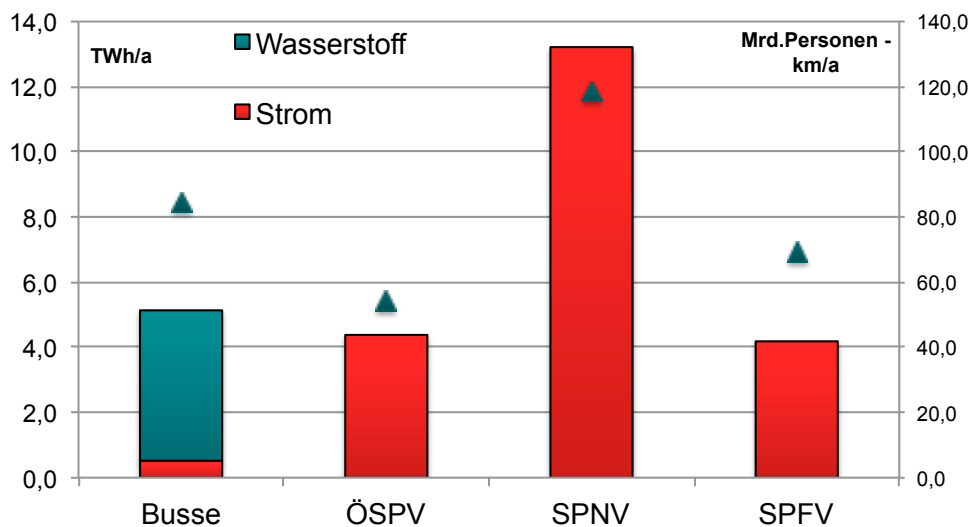


Abbildung 3-4: Energieträgereinsatz und Personen-Beförderung im ÖPV im Jahr 2035 auf dem Dekarbonisierungspfad.

Quelle: Rudolph et al. 2017

Politikinstrumente und Optionen für die Zukunft

Die Klimamaßnahmen des BMVI sehen nach Medienberichten derzeit eine Mittelausstattung für die Schiene von 6,2 Mrd. € pro Jahr über 10 Jahre vor. Trotz dieses Modernisierungsprogramms bedarf die zukunftsfähige Finanzierung des öffentlichen Verkehrs kontinuierlich ausreichend Mittel. Das Dekarbonisierungsszenario schlägt folgende Finanzierungsmechanismen vor (vgl. Rudolph et al. 2017):

- Allgemeiner Ö(PN)V-Beitrag / Bürgerticket
- ÖPNV-Fonds aus Steuermitteln (Gewerbesteuer, Grunderwerbssteuer u.a.)
- Drittnutzerfinanzierung durch Arbeitgeber, Einzelhandel und Veranstalter
- Verwendung der Einnahmen einer (distanzbasierten) Pkw-Maut

Interessant für die Dekarbonisierung des öffentlichen Verkehrs und damit für die Nutzung von H₂ und PtX könnte bereits in naher Zukunft die „Clean Vehicles Directive“ sein, deren Revision im April 2019 vom Europäischen Parlament beschlossen wurde und die sich derzeit beim Europäischen Rat zur formalen Verabschiedung befindet. Die Clean Vehicles Directive (CVD, derzeit noch 2009/33/EC) regelt die öffentliche Beschaffung neuer Fahrzeuge. Die revidierte CVD wird für unterschiedliche Fahrzeugklassen definieren, was unter einem sauberen Fahrzeug zu verstehen ist, und ein Quotensystem einführen.

So werden die nationalen Ziele für die Vergabe öffentlicher Aufträge für umweltfreundliche Busse im Jahr 2025 europaweit zwischen 24 und 45 Prozent liegen, 2030 sollen es abhängig vom Bruttoinlandsprodukt (BIP) schon zwischen 33 und 66 Prozent sein. Bei Bussen gibt es eine zusätzliche Bedingung: Die Hälfte aller öffentlich angeschafften Fahrzeuge muss komplett emissionsfrei sein - in Deutschland werden damit bis 2025 fast ein Viertel der neuen öffentlichen Busse mit null Emissionen auskommen (vgl. Rudolph & Werland 2019).

Flugverkehr

Für den Kraftstoffeinsatz im Flugverkehr gelten Besonderheiten in Bezug auf die Sicherheit des Kraftstoffs sowie die Spezifikationen, die international gleich sein müssen, da Flugzeuge in der Regel nicht nur im Heimatland betankt werden.

Ein klimaneutraler Flugverkehr ist nur über synthetische Kraftstoffe darstellbar. Denkbar wäre der Einsatz von Biokraftstoffen der 2. Generation (so genannte „advanced bio fuels“); der großmaßstäbliche Einsatz wird aber unter Nachhaltigkeits-Gesichtspunkten als kritisch angesehen und daher im Dekarbonisierungsszenario nicht weiter verfolgt.

Zudem ist der Kraftstoffeinsatz im Flugzeug aufgrund der Flughöhe, in der die Emissionen freigesetzt werden, besonders klimasensibel, so dass eine Reduktion der Verkehrsleistung überproportional zum Klimaschutz beiträgt.

Konsequenterweise sind im Dekarbonisierungsszenario die inländischen Flugverbindungen durch den öffentlichen Schienen-Fernverkehr ersetzt worden – auch das ein Beispiel dafür, dass die Mobilitätswende nur gelingt, wenn auch teils umstrittene Weichenstellungen seitens der Politik entschlossen umgesetzt werden.

Der Kerosin-Inlandsabsatz, der sowohl für den nationalen Luftverkehr als auch für die Auslandsflüge mit Start in Deutschland verwendet wird, hat eine ansteigende Tendenz. Wurden in Deutschland im Jahr 2004 noch 83 TWh Kerosin abgesetzt, waren es im Jahr 2014 bereits 100,5 TWh. Davon entfielen 2014 8,25 TWh (8,2%) auf den nationalen Flugverkehr (DIW 2017). Bei einer Verlagerung der inländischen Flüge auf die Schiene bliebe damit der Großteil der Verkehrsleistung nach wie vor bestehen.

Wie eingangs erwähnt, deckt das Dekarbonisierungsszenario den Flugverkehr mit Quelle oder Ziel außerhalb von Deutschland nicht ab. Für die vorliegende Kurzstudie wird der Bedarf aus dem *Beyond 2° Scenario* der International Energy Agency (IEA 2017) zu rund 73 TWh an Kerosin im Jahr 2035 bestimmt. Aufgrund der Eigenschaften bzw. des technisch aufwendigen Herstellungsverfahrens von synthetischen Kraftstoffen (PtL) wird nach Viebahn et al. (2018) und EUCAR et al. (2008) das Verhältnis des Energieaufwands von PtL zu Kerosin zu 1,597 TWh PtL / TWh Kerosin bestimmt. Damit ergibt sich ein Bedarf von rund 116 TWh PtL für 2035.

Politikinstrumente und Optionen für die Zukunft

Im Hinblick auf den internationalen Flugverkehr stellt das Wuppertal Institut in seinem Dekarbonisierungsszenario fest, dass die deutsche Regierung die Anzahl von Starts und Landungen in Deutschland begrenzen könnte. Darüber hinaus könnte sie die Befreiung des Kerosins von der Energiesteuer und die Befreiung internationaler Flüge von der Mehrwertsteuer abschaffen. Auch die häufig gewährten Betriebsbeihilfen für Flughäfen wirkten als Subvention kontraproduktiv (Rudolph et al. 2017).

Dass eine CO₂-Steuer in der aktuell diskutierten Höhe die Anzahl von Flügen reduzieren könnte, ist kaum vorstellbar, allerdings würde sie zumindest eine relative Verteuerung des Flugverkehrs mit sich bringen und könnte im Verbund mit den anderen im Szenario genannten Instrumenten Wirkung entfalten. Allerdings erscheint die öffentliche Debatte an sich wirkungsrelevant, da sie einige Menschen zum Umdenken

ihrer Mobilitätsmuster bringen kann. Ein (empirischer) Nachweis dazu steht allerdings aus.

Personenverkehr in der internationalen Seeschifffahrt wird im Abschnitt zum Güterverkehr miterfasst.

3.2 Güterverkehr

Im Gegensatz zum Personenverkehr wird für den Güterverkehr auch im Dekarbonisierungsszenario eine leichte Steigerung des Verkehrsaufwands gegenüber dem Ist-Stand (2015) zugelassen. Diese fällt allerdings geringer aus als in den meisten anderen Szenarien (siehe Abbildung 2.2, S. 11; vgl. auch Rudolph et al. 2017) und stellt eine deutliche Wachstumsreduktion dar.

Auch die Verlagerung auf andere Verkehrsträger ist derzeit nur begrenzt machbar. Sollen im hohen Maßstab Güter per Schiene oder Schiff transportiert werden, erfordert das Investitionen in die Infrastruktur, die nur mittelfristig (etwa zum Zeitraum um das Jahr 2035 als Bezug der vorgelegten Daten) wirksam werden können. Der Modal Split des Güterverkehrs wird im Dekarbonisierungsszenario so weit wie möglich auf die Schiene sowie die Binnenschifffahrt verlagert (siehe Tabelle 3-1). Der Großteil des Güterverkehrs wird dann zwar nach wie vor auf der Straße abgewickelt, die Anteile von Schiene und Binnenschifffahrt nehmen aber deutlich zu.

Tabelle 3-1: Modal Split im Güterverkehr; Stand 2015 sowie Ausblick (Dekarbonisierungspfad 2035).

Verkehrsaufwand	2015 (DIW 2017)		2035 (Rudolph et al. 2017)	
Straße	460 Mrd. Tkm	72,8 %	388 Mrd. tkm	54,6 %
Schiene	117 Mrd. Tkm	18,5 %	229 Mrd. tkm	32,2 %
Binnenschiff	55 Mrd. Tkm	8,8 %	94 Mrd. tkm	13,2 %
Gesamt	631 Mrd. Tkm	100 %	711 Mrd. tkm	100 %

Güterverkehr - Straße

Auch die technischen Möglichkeiten durch Antriebs- und Kraftstoffwechsel sind im Güterverkehr nur begrenzt verfügbar. Da die Transportaufgabe es gebietet, so wenig Gewicht wie möglich für Antrieb und Kraftstofftank zu nutzen, sind synthetische flüssige Kraftstoffe mit ihrer hohen spezifischen Energiedichte in den meisten Ausblicken und Studien das Mittel der Wahl für den Güterverkehr.

Im Dekarbonisierungsszenario wird zwar die Strategie verfolgt, den Lkw-Verkehr durch Oberleitungen zu elektrifizieren, diese können aber nicht den gesamten Bedarf auffangen und müssen durch Power-to-Liquid ergänzt werden.

Wie im Pkw-Bereich verschiebt sich die Flottenzusammensetzung auch bei den Lkw hin zu kleineren Fahrzeugen. So stellen die leichten Nutzfahrzeuge (LNF) gut die Hälfte der Fahrleistung, bezogen auf die Fahrzeugkilometer (siehe Abbildung 3-5), während der Großteil der Waren (ausgedrückt in Tonnen-Kilometern) über Sattel-schlepper und Gliederzüge transportiert wird. Das wird deutlich in Abbildung 3-6.

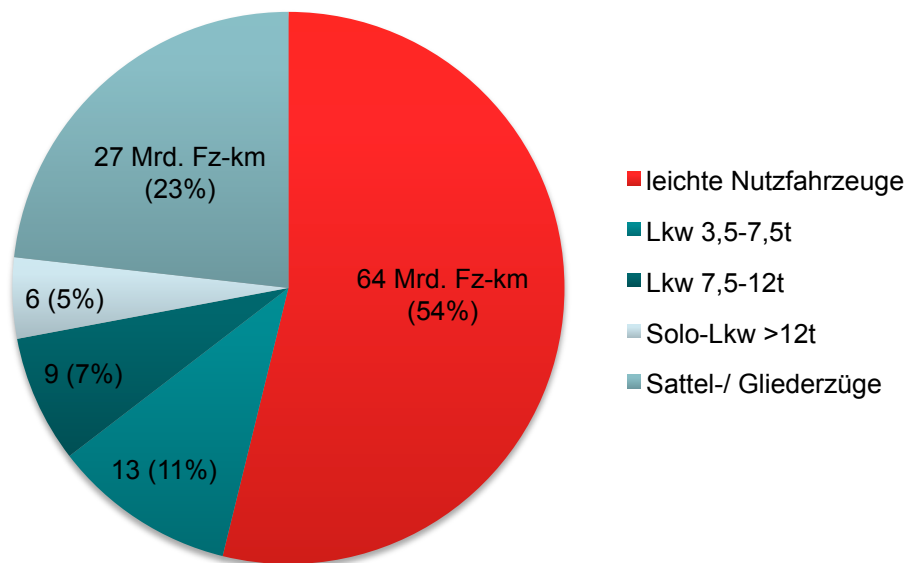


Abbildung 3-5: Aufteilung des Verkehrsaufwands in Fahrzeug-Kilometern auf die Lkw-Segmente (Bezug Deutschland, im mittelfristigen Ausblick, d.h. etwa im Jahr 2035 auf dem Dekarbonisierungspfad). Quelle: Rudolph et al. 2017

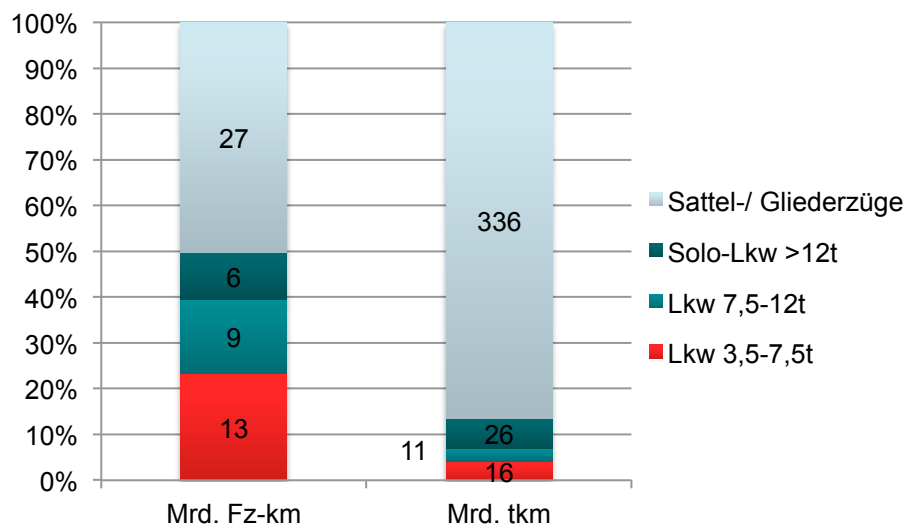


Abbildung 3-6: Vergleich der Verkehrsleistungen nach Fahrzeug- und Tonnen-Kilometern für die verschiedenen Lkw-Segmente; ohne leichte Nutzfahrzeuge (LNF; Bezug Deutschland, im mittelfristigen Ausblick, d.h. etwa im Jahr 2035 auf dem Dekarbonisierungspfad). Quelle: Rudolph et al. 2017

Diese Sattel- und Gliederzüge mit ihren großen Transportkapazitäten werden zum überwiegenden Teil über Oberleitungen mit Strom „betankt“; nur der kleinere Teil von rund 18 % wird über PtL betrieben (Abbildung 3-7). Am vielfältigsten sind die Antriebsarten im Segment der LNF, wo sich von PtL (41%) über Plug-In Hybrid (25%) auch BEV (17%) und die Brennstoffzelle (11%) wiederfinden. In den anderen Lkw-Segmenten dominiert der Kraftstoff PtL, ergänzt um Plug-In-Hybride.

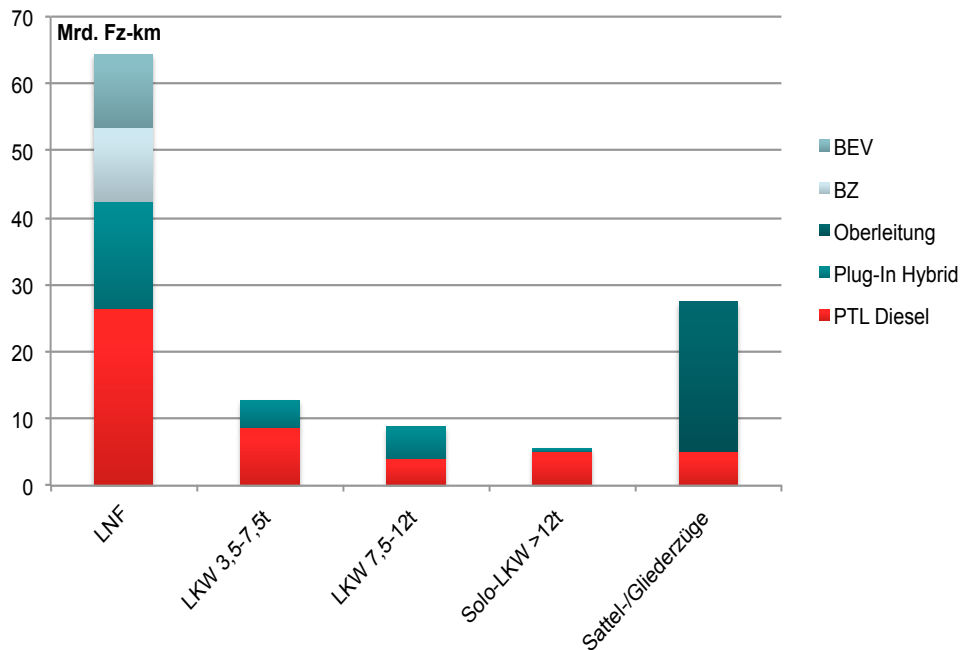


Abbildung 3-7: Fahrleistungen im Straßen-Güterverkehr nach Energieträger (Mrd. Fz-km, Bezug Deutschland, im mittelfristigen Ausblick, d.h. etwa im Jahr 2035 auf dem Dekarbonisierungspfad). Quelle: Rudolph et al. 2017

Im Straßen-Güterverkehr wird der synthetische Kraftstoff PtL also benötigt. Die Bedeutung von Plug-In-Hybriden sinkt mit der Größe der zugelassenen Zuladung, die Anzahl ist also geringer für die größeren Fahrzeuge ab 7,5 Tonnen und darüber hinaus. PtL wird genutzt, um die Fahrzeuge zu betreiben, für welche die Plug-In-Lösung nicht verwendet werden kann.

Güterverkehr – Schiene und Schiff

Die höhere Verkehrsleistung im Güterverkehr wird mit Elektrozügen erbracht, es entfällt nur ein kleinerer Teil auf die Dieseltraktion mit PtL. Das ist konsequent, da die Effizienz beim elektrischen Betrieb höher ist (ca. 0,13 MJ/Mrd. tkm oder ca. 36 MWh/ tkm gegenüber rund 0,3 MJ/Mrd. tkm oder ca. 83 MWh/tkm Diesel bzw. PtL). Zurückzuführen ist die etwa doppelte Effizienz auf den höheren Wirkungsgrad des Elektromotors gegenüber Dieselmotor, noch gesteigert durch die Möglichkeit, beim Bremsen Energie zurückzugewinnen und zu nutzen.

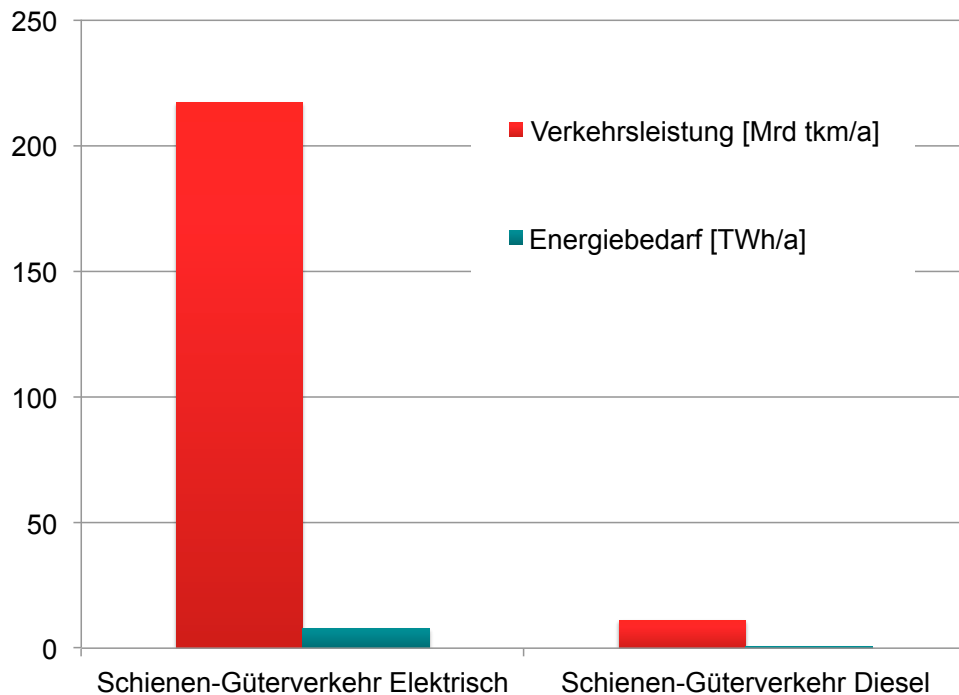


Abbildung 3-8: Verkehrsleistung und Energiebedarfe im Schienen-Güterverkehr nach Energieträger (Bezug Deutschland, im mittelfristigen Ausblick, d.h. etwa im Jahr 2035 auf dem Dekarbonisierungspfad). Quelle: Rudolph et al. 2017

Der internationalen Seeschifffahrt kommt eine besondere Rolle zu. Im Dekarbonisierungsszenario ist nur die Binnen-Schifffahrt betrachtet worden; die meisten Energie- und Verkehrsszenarien lassen die internationale Seeschifffahrt außen vor.

Abweichend von der bisherigen Methodik werden die Verkehrsaufwände sowie die Kraftstoffverbräuche daher nicht nach Rudolph et al. (2017) aus dem Dekarbonisierungsszenario entnommen, sondern aus dem „B2DS“-Szenario der „Energy Technology Perspectives“ der IEA (2017) extrahiert, wie schon eingangs im Abschnitt 0 erläutert.

Auch hier wird davon ausgegangen, dass der Anteil der deutschen Kraftstoffnachfrage am EU-weiten Bedarf im Ausblick konstant bei rund 7 % bleibt (auf Basis von DIW 2017). In 2035 beträgt die Nachfrage nach Heavy Fuel Oil demnach knapp 27,8 TWh. Analog zum Vorgehen bei der Ermittlung des PtL-Bedarfs im Flugverkehr errechnet sich daraus ein Bedarf an PtL für die Seeschifffahrt von rund 44,2 TWh.

Politikinstrumente und Optionen für die Zukunft

Das vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Mai 2019 veröffentlichte Maßnahmenpaket hat einen Schwerpunkt im Bereich Güterverkehr. Zwei der sechs Themenfelder sind „Güterverkehr“ und „Nutzfahrzeuge“, hinzu kommen die Querschnittsthemen „Alternative Kraftstoffe“ und „Digitalisierung“. Von den insgesamt 55 Mio. zugewiesenen Tonnen CO₂-Senkung entfallen auf den Güterverkehr und die Nutzfahrzeuge 19-21 Tonnen. Hinzu sollen 9-10 Mio. Tonnen für alternative Kraftstoffe kommen, deren Nutzung wegen ihrer hohen Energiedichte vor allem im Güterverkehr sinnvoll ist (vgl. Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Gesamtpaket aus Klimaschutzmaßnahmen des BMVI, Mai 2019. Quelle: Website BMVI

Feld	Themen	CO ₂ -Senkung
1) ÖV, Rad und Fuß	Schienenpersonenverkehr stärken ÖPNV attraktiver machen Radwege und Parkmöglichkeiten für Fahrräder schaffen	7-8 Mio. Tonnen
2) Alternative Kraftstoffe	Strombasierte Kraftstoffe voranbringen Fortschrittliche Biokraftstoffe unterstützen	9-10 Mio. Tonnen
3) Güterverkehr	Schienengüterverkehr stärken Binnenschifffahrt modernisieren	ca. 2 Mio. Tonnen
4) Pkw	CO ₂ -arme Pkw auf die Straße bringen Ladeinfrastruktur ausbauen	9-10 Mio. Tonnen
5) Nutzfahrzeuge	CO ₂ -arme Lkw auf die Straße bringen Tank- und Ladeinfrastruktur ausbauen	17-18 Mio. Tonnen
6) Digitalisierung	Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen, innovative Mobilitätsformen ermöglichen	6-7 Mio. Tonnen
CO ₂ -Senkung gesamt		bis zu 55 Mio. Tonnen

Unter den für Nutzfahrzeuge genannten Politikinstrumenten (in der Tabelle unter Nr. 5 subsummiert) erscheint die CO₂-Flottenregulierung der EU-Kommission am vielversprechendsten, durch den Güterverkehr emittiertes CO₂ in Zukunft signifikant reduzieren zu können. Die EU-Kommission hatte im Mai 2018 diese „CO₂-emission standards for heavy duty vehicles“ als Teil ihres dritten Mobilitätspakets vorgeschlagen. Die nachfolgenden Verhandlungen führten zu einer Einigung zwischen Kommission, Parlament und Rat im Februar 2019, die formale Ratifizierung des Europäischen Rats steht aktuell (Juli 2019) allerdings noch aus.

Die Verordnung wird vorsehen, dass die durchschnittlichen CO₂-Emissionen neuer Lkw im Jahr 2025 um 15% niedriger sein werden als im Jahr 2019. Für 2030 wird ein indikatives Reduktionsziel von mindestens 30% gegenüber 2019 festgelegt. Für emissionsfreie und emissionsarme Fahrzeuge werden besondere Anreize geschaffen. Die vorgeschlagene Verordnung gilt für Lkw-Kategorien, die zusammen 65%-70% der CO₂-Emissionen aller schweren Nutzfahrzeuge verursachen (European Parliament 2019).

Im Vergleich dazu schlägt das Wuppertal Institut in seinem Szenario als zusätzlich wichtiges Instrument zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs Oberleitungen für Sattelzüge auf den Bundesautobahnen vor. Auf diese Weise können für diese Streckenabschnitte die hohen Wirkungsgradverluste vermieden werden, die durch die vielen Umwandlungsschritte bei der Herstellung strombasierter Kraftstoffe (PtX) in Kauf genommen werden müssten. PtX wären als alternative Dekarbonisierungsstrategie des Straßengüterverkehrs denkbar. Gerbert et al. (2018) stellen in ihrer Expertise für den BDI in diesem Zusammenhang fest, dass Lkw-Oberleitungen zumindest auf den meistbefahrenen 4.000 km Bundesautobahnen deutlich weniger Ver-

meidungskosten bis 2050 generieren würden als ein Ersatz von fossilem durch synthetischen Diesel (PtL).

Das Dekarbonisierungsszenario schlägt zur notwendigen Güterverkehrsverlagerung außerdem massive Investitionen in die Schieneninfrastruktur vor, nämlich insbesondere Ausbau, Lückenschlüsse und Gleisanschlüsse; sowie neue multimodale Terminals für den kombinierten Verkehr (Rudolph et al. 2017). Das BMVI erkennt den Nachholbedarf bei Investitionen in die Schieneninfrastruktur an, der ursprüngliche Mittelanstieg von April 2019 über 3 Mrd. Euro pro Jahr (Nr. 3 in Tabelle 3-2, vgl. Website BMVI) wurde inzwischen auf 62 Milliarden Euro über 10 Jahre (6,2 Mrd. pro Jahr) aufgestockt. Weitere Investitionen von Bahn und öffentlicher Hand erscheinen wegen der Größe der Herausforderung sinnvoll.

Im Güterverkehr zeigt sich in besonderem Maße die Herausforderung der Dekarbonisierung des Verkehrssektors: Aufgrund des hohen zu transportierenden (Eigen-) Gewichts stößt die direkte Elektrifizierung mit hohen möglichen Wirkungsgraden bei guten Alternativoptionen zur Verlagerung, wie sie im Personenverkehr grundsätzlich möglich ist, an ihre Grenzen.

Es sind entweder massive (öffentliche) Investitionen in Schiene und Binnenschiff sowie Oberleitungen an Autobahnen notwendig oder ein massiver Ausbau erneuerbarer Energien im In- und Ausland bei massivem Import von Strom bzw. strombasierten Produkten. Ein Einsatz von synthetischen Kraftstoffen geht mit Wirkungsgradverlusten und in der Konsequenz mit relativ hohem Strombedarf und volkswirtschaftlichen Kosten im Vergleich zu direkter Stromnutzung einher. Aufgrund technischer Fortschritte werden sich die Wirkungsgradverluste entlang der Prozesskette mit ziemlicher Sicherheit zukünftig stetig reduzieren lassen (Sternner et al. 2015), an den Relationen zum direktelektrischen Antrieb ändert dies aber nichts (ausführlicher auch in Rudolph 2019).

In der Praxis bleibt der Politik zur Erreichung ihrer Klimaschutzziele neben der Fahrzeugeffizienz letztlich keine Wahl zwischen beiden Strategien, sondern sie hat beide konsequent zu verfolgen - Verlagerung des Straßengüterverkehrs und Bereitstellung von dekarbonisiertem, synthetischem Treibstoff für den Lkw-Sektor. Diese Erkenntnis demonstriert nicht nur das Dekarbonisierungsszenario, sondern auch die anderen in Abschnitt 2.4 vorgestellten Szenarien.

Wasserstoff bzw. synthetischer Treibstoff wird darüber hinaus auch in erheblichen Dimensionen für die internationale Seeschifffahrt benötigt werden.

4 Ergebnisse

Zunächst wird der Bedarf an Energieträgern, dann das Lastprofil für eine ungesteuerte Ladung von Elektro-Pkw im Zieljahr dargestellt.

4.1 Bedarf an Energieträgern für den dekarbonisierten Verkehrssektor

Die Bedarfe an den Energieträgern für alle beschriebenen Verkehrsleistungen sind in Abbildung 4-1 gezeigt. Dabei ist die Nachfrage an PtL für die Bereiche Land (Schiene und Straße), See (Binnenschifffahrt und internationaler Seeverkehr) sowie Luft (internationaler Flugverkehr) aufgeteilt, um den jeweiligen Hebel deutlich zu machen.

Der internationale Flugverkehr benötigt die größte Menge an PtL-Kraftstoff und verdoppelt den Endenergiebedarf im Personenverkehr. Nationaler Flugverkehr findet im Dekarbonisierungsszenario nicht mehr statt, sondern ist auf die Schiene verlagert. Er trägt allerdings zum derzeitigen Stand mit rund 9 % nur gering zum Flugverkehrsaufkommen bei. Internationaler Frachtflugverkehr wird im zugrunde liegenden „B2DS“ Szenario der International Energy Agency (2017) ebenfalls nicht mehr angenommen.

Der internationale Seeverkehr wird nicht typischerweise zum Verkehrsaufkommen und damit zur Erhebung des Kraftstoffbedarfs hinzugerechnet. Der Anteil der Binnenschifffahrt ist mit 15 % etwas höher als der nationale Anteil im Flugverkehr. Eine weitere Steigerung hier würde zu einer Entlastung des Straßen-Güterverkehrs beitragen.

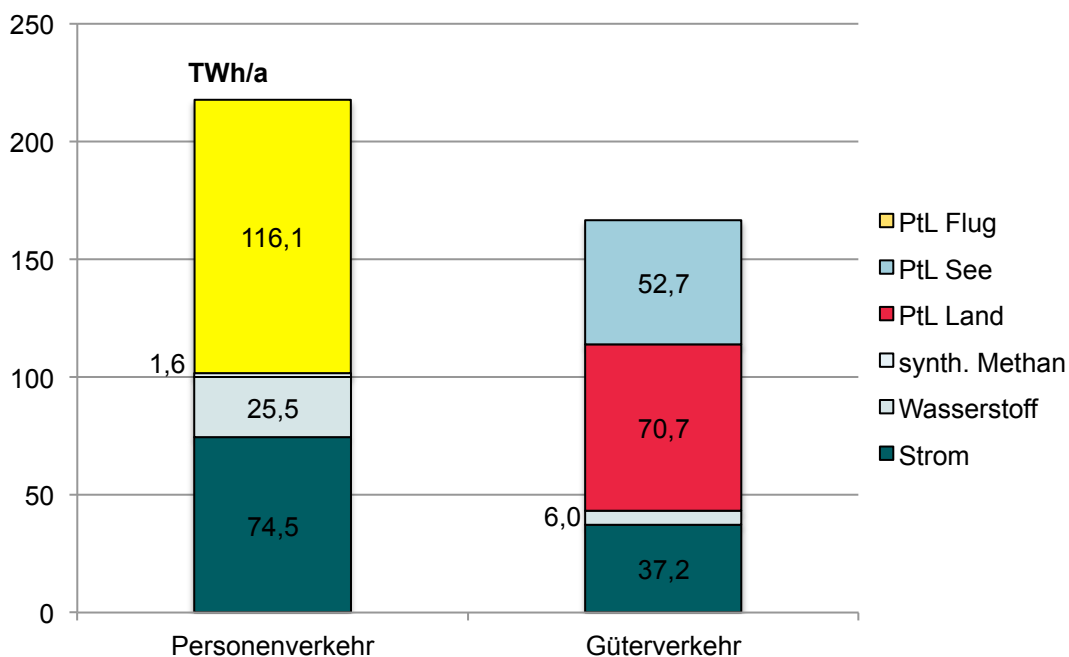


Abbildung 4-1: Energiebedarfe des Personen- und Güterverkehrs nach Energieträgern (Bezug Deutschland, im mittelfristigen Ausblick, d.h. etwa im Jahr 2035 auf dem Dekarbonisierungspfad). Quelle: Rudolph et al. 2017

Der Strombedarf für die Erzeugung dieser Kraftstoffnachfrage liegt bei insgesamt 670 TWh/a. Rudolph et al. (2017) weisen – ohne Berücksichtigung des internationalen See- und Luftverkehrs – rund 240 TWh/a aus. Demgegenüber steht eine gesamte Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2017 von rund 655 TWh, davon sind rund 218 TWh regenerativ erzeugt worden (AGEB et al. 2018). Um die Synthese zu PtL-

Kraftstoff zu betreiben, werden neben dem Strom zudem rund 56,2 Mt/a an CO₂ benötigt.

Die Relation der Stromerzeugungsmengen verdeutlicht die Größe der Aufgabe, den gesamten Verkehrssektor treibhausgasneutral zu stellen. Im beschriebenen Dekarbonisierungsszenario ist bereits der größtmögliche Anteil des Verkehrs direkt elektrifiziert worden; nur in den Anwendungen, wo dies technisch und praktisch wenig sinnvoll ist, wird PtL eingesetzt.

Die Synthese wird aufgrund der mehreren benötigten Umwandlungsstufen immer einen schlechteren Wirkungsgrad haben als die direkte Stromnutzung, auch wenn sich die Effizienz der Prozesse sicherlich noch erheblich steigern lassen wird (Stern et al. 2015).

Die Zahlen weisen aber auch auf den Hebel im internationalen Flug- und Seeverkehr hin. Die Daten sind aus dem „beyond 2°C Scenario“ (B2DS) der International Energy Agency entnommen (IEA 2017), das ebenfalls schon ein hohes Ambitionsniveau in den Klimaschutzbemühungen darstellt. Der Rückgang im internationalen Flugverkehr um rund 25 % bis 2035 und rund 40 % bis 2060 ließe sich aber möglicherweise noch steigern. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um zu belastbaren Zahlen zu gelangen.

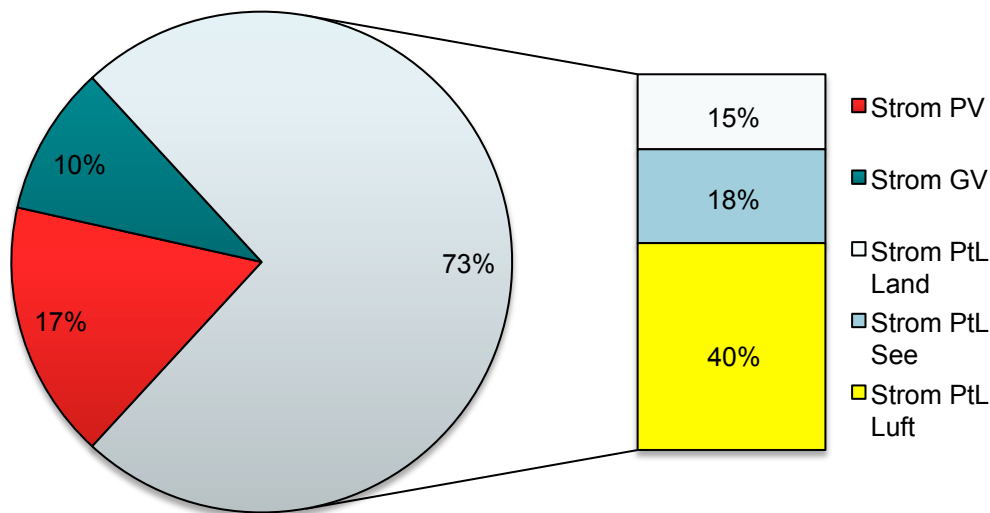


Abbildung 4-2: Strombedarf zur Bedarfsdeckung der Verkehrsnachfrage nach Kraftstoffen; Gesamter Strombedarf ca. 670 TWh/a (Bezug Deutschland, im mittelfristigen Ausblick, d.h. etwa im Jahr 2035 auf dem Dekarbonisierungspfad). Quelle: Rudolph et al. 2017

4.2 Lastprofil für eine ungesteuerte Ladung von Elektro-Pkw im Zieljahr

Der direkte Strombedarf der individuellen E-Mobilität setzt sich zusammen aus den jeweiligen Stromverbräuchen für die Batteriefahrzeuge (Battery Electric Vehicle – BEV) und die Plug-in-Hybridfahrzeuge (Plug-in Hybrid Electric Vehicle – PHEV). Dieser fällt nicht kontinuierlich an, sondern richtet sich nach dem Fahr- bzw. Park- und Lade-„Verhalten“ der Autos. Daher ist die Berücksichtigung von Lastprofilen nicht nur für die Bedarfsdeckung, sondern auch für die Ausgleichsmöglichkeiten der fluktuierenden Stromerzeugung von großer Bedeutung, da die Strombatterien der Autos grundsätzlich steuerbar und bidirektional nutzbar sind. Bei der Kopplung vom E-Pkw mit dem Stromsystem sind diesbezüglich folgende drei Nutzungsfälle zu unterscheiden:

- 1 | Ungesteuertes Laden, d.h. das Auto wird (möglichst vollständig) geladen, sobald es am Stromnetz angeschlossen wird und stellt somit eine reine Last und keine Flexibilitätsoption dar (wichtig als Referenz und wahrscheinlich für kleine Flotten bzw. für die Markteinführung)
- 2 | Gesteuertes Laden, d.h. die Ladung der Autobatterie erfolgt in Abhängigkeit von externen Signalen wie z.B. Strompreisen im Rahmen eines Lastmanagements (DSM) und stellt somit eine steuerbare Last dar (wichtig als Flexibilitätsoption und wahrscheinlich für Netzgebiete mit schwachem Netz bzw. starker erneuerbarer Stromeinspeisung)
- 3 | Gesteuertes Be- und Entladen (vehicle-to-grid oder V2G-Konzept), d.h. die Autobatterie wird in Abhängigkeit von externen Signalen nicht nur beladen, sondern darf auch anteilig entladen werden, um so z.B. mangelnde Stromerzeugung auszugleichen oder das Stromnetz zu stabilisieren (wichtig als Flexibilitätsoption und wahrscheinlich für hohe E-Pkw Anteile und hohen Anteilen von erneuerbarer Stromerzeugung).

Lastprofil von BEV

Im Folgenden werden die stündlichen Lastprofile für BEV im Zieljahr dargestellt, die aus dem zuvor dargestellten Szenario für eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors resultieren. Anschließend werden die möglichen Beiträge der o.g. Flexibilitätsoptionen für ein erneuerbares Stromsystem aufgezeigt und diskutiert.

Die Ausgangsbasis für die Lastprofile bilden:

- Eine Berechnungsroutine für Lastprofile von Elektro-Pkw, die am Wuppertal Institut entwickelt wurde.³
- Das Mobilitätsverhalten der Bewohnerinnen und Bewohner Deutschlands, insbesondere Wegezeitpunkt und Wegedauer (Mobilität in Deutschland 2008, infas & DLR 2010).⁴
- Die folgenden Annahmen aus Tabelle 4-1.

³ siehe: Endbericht EEG-V <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/354/>

⁴ Diese Panelerhebung wurde 2017 aktualisiert, die zugrundeliegenden Wegedaten haben sich jedoch nur unwesentlich verändert, sodass keine (aufwändige) Aktualisierung der Berechnungsroutine vorgenommen werden musste.

Tabelle 4-1: Grundlegende Annahmen für die Bestimmung von Lastprofilen für E-Pkw. Quelle: eigene Annahmen; BMU 2010; Rudolph et al. 2017

Parameter	Annahme
Pkw-Bestand	
Pkw, insg.	25.360.826
davon BEV	20.086.449
Fahrleistungen	
Pkw, insgesamt	297 Mrd. km/a
davon BEV	235 Mrd. km/a
Jahresfahrleistung pro BEV	11.692 km/a
Ø Tagesfahrleistung pro E-Pkw	32,0 km/d
Wochentag	34,5 km/d
Wochenende	25,9 km/d
Ø Stromverbrauch BEV auf 100 km	15,8 kWh/100km
Ladeleistung pro Fahrzeug	3,5 kW
Kapazität pro Fahrzeugbatterie	25 kWh
Wirkungsgrad (Li-Ionen)	95%
Selbstentladung (Li-Ionen)	1%/M (0,0014 %/h)
Annahmen zum Fz.-Anteil mit Netzanschluss	min. 20% der KFZ am Netz, max. 80% der KFZ am Netz
Lastprofil separat für Wochentage	Freitag, Samstag, Sonntag

Für die Bestimmung eines Lastprofils von E-Pkw werden im ersten Schritt Energieverbrauchsprofile in stündlicher Auflösung für verschiedene Wochentage berechnet. Die Grundlagen dafür bilden zum einen die spezifischen Fahraufwände und Verbrauchswerte von solchen Pkw und zum anderen die in der Panelstudie „Mobilität in Deutschland“ erhobenen Wegedaten (infas & DLR 2010; siehe Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Gruppierte Wegedaten für den MIV, Beginn des Weges hochgerechnet in Mio. km nach Wochentagen und Zeiträumen. Quelle: Mobilität in Tabellen 2008, zusammengefasst in infas & DLR 2010

	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
vor 5 Uhr	6	5	4	5	5	12	3
5 bis vor 7	28	23	25	25	24	9	3
7 bis vor 9	33	32	30	34	35	22	9
9 bis vor 11	18	20	22	24	33	30	28
11 bis vor 14	30	28	27	33	54	55	39
14 bis vor 17	45	45	51	51	51	36	43
17 bis vor 20	38	41	42	45	47	30	41
20 bis vor 22	8	9	9	9	9	13	8
nach 22 Uhr	4	4	5	6	10	8	3

Die Wegedaten dienen dazu, zwischen Autos zu unterscheiden, die fahren, und solchen, die stehen und beladen werden können. Zur Vereinfachung und weil sich die ersten vier Wochentage nur wenig strukturell unterscheiden, werden die Daten zu vier Wochentypen (Mo.-Do., Fr., Sa., So.) zusammengefasst. Die aggregierten Zeiträume werden auf 24 h eines Tages linear extrapoliert; die entstehende unstetige, stufenförmige „Kurve“ wird durch eigene Annahmen in eine geglättete und letztlich normierte Kurve der täglichen Fahraufwände überführt. Daraus folgt zusammen mit den spezifischen Fahraufwänden und Verbrauchswerten der wochentägliche Energieverbrauch von E-Pkw in stündlicher Auflösung.

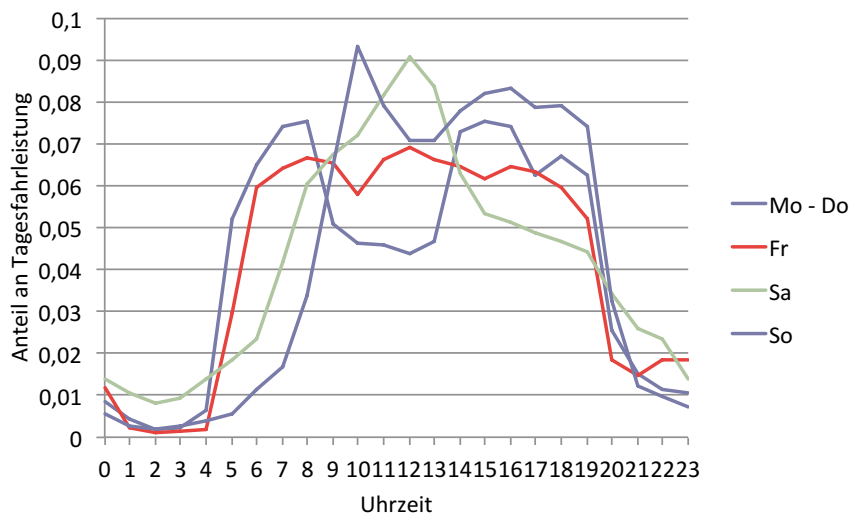


Abbildung 4-3: Normierte wochentägliche Fahrleistungen von E-Pkw. Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von infas & DLR 2010 (Mobilität in Tabellen)

Als Zweites wird auf dieser Basis ein sogenanntes Referenzladeprofil für die ungesteuerte Beladung der E-Pkw generiert. Dafür wird unterstellt, dass

- das unregelmäßige Laden nur am privaten Hausanschluss stattfindet,
- die Fahrten, die in Stunde i begonnen haben, in Stunde $i+1$ enden und
- die Akkus vollständig geladen werden.

Für die Bestimmung des Referenzladeprofils müssen zusätzlich Annahmen darüber getroffen werden, wann welcher Anteil begonnener Fahrten am Hausanschluss endet. Der unterstellte Verlauf beendeter Fahrten ist in der folgenden Abbildung 4-4 dargestellt. Demnach endet in der Nacht der größte Anteil der Fahrten (60-80%) bis gegen 3 Uhr, dieser sinkt dann bis gegen 10 Uhr auf ein Minimum von 20% und steigt dann wieder, je nach Wochentag, unterschiedlich schnell wieder auf 70-80% an. Das Produkt aus diesem Verlauf und der Anzahl der nach einer Stunde wieder beendeten Fahrten ergibt die Anzahl der in dieser Stunde ans Stromnetz gehenden Fahrzeuge.

Zusammen mit dem spezifischen Stromverbrauch pro km und der täglichen Fahrleistung lässt sich daraus und im Kontext der obigen Annahmen das Referenzladeprofil für die ungesteuerte Ladung eines E-Pkw ableiten. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4-5 für ein BEV und die vier betrachteten Wochentage bzw. Wochentagstypen.

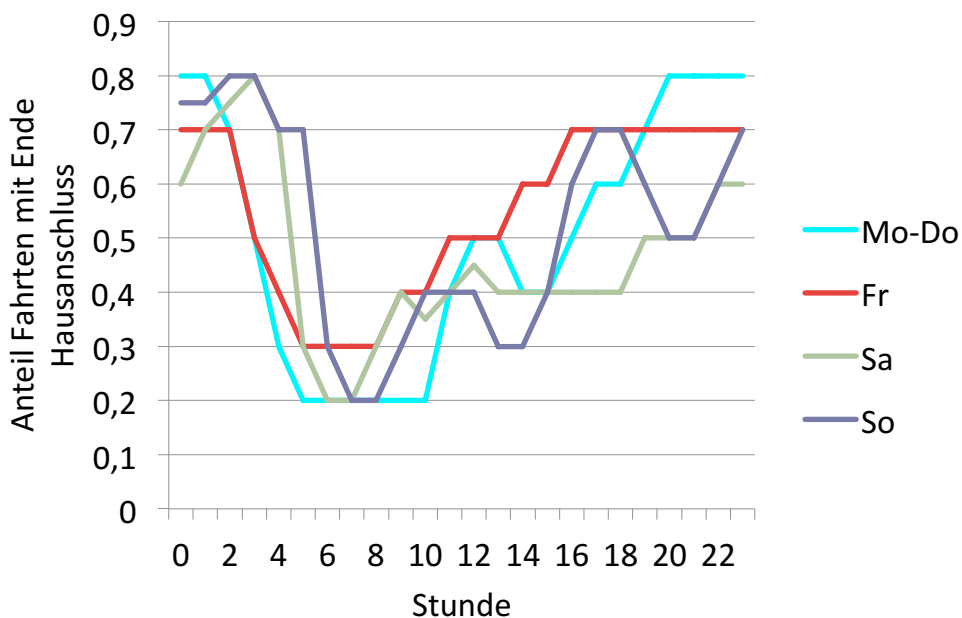


Abbildung 4-4: Verlauf der Fahrtenenden von E-Pkw am Hausanschluss. Quelle: Eigene Annahmen

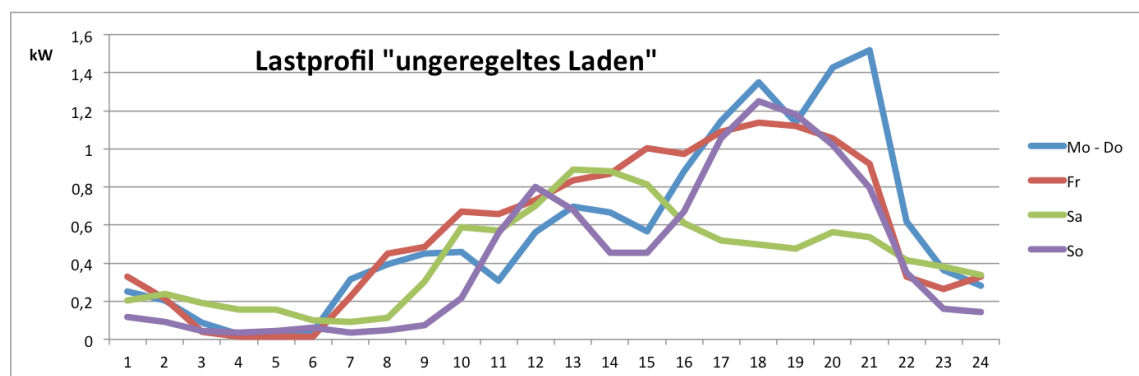


Abbildung 4-5: Lastprofile eines durchschnittlichen batterieelektrischen Fahrzeugs der BEV-Flotte Mo-Do, Fr, Sa und So. Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von infas & DLR 2010 (Mobilität in Tabellen)

Mit diesem spezifischen Lastprofil können nun die resultierenden Lastgänge von E-Pkw in Szenarien abgebildet werden. Für das oben betrachtete Dekarbonisierungsszenario ergibt sich im Zieljahr das folgende exemplarische Lastprofil (Abb. 4-6) für die erste vollständige Kalenderwoche und eine ungesteuerte Beladung der BEV. Man sieht, dass demnach die gesamte Ladeleistung für alle BEV zwischen wenigen MW_{el} (Min.=113 MW_{el}) in den frühen Morgenstunden und gut zwölf GW_{el} (Max.=12.091 MW_{el}) in den späten Abendstunden liegt, wenn sie ungesteuert geladen werden.

Solche Lastspitzen, die zudem nur relativ kurzfristig auftreten, würden zu erheblichen Rückwirkungen auf das Stromsystem (Erzeugung und Netze) führen und sind daher wenig systemkompatibel. Zur Vermeidung würde die Beladung der E-Pkw extern gesteuert werden, z. B. zeitlich gestaffelt werden und/oder im Rahmen von DSM-Maßnahmen.

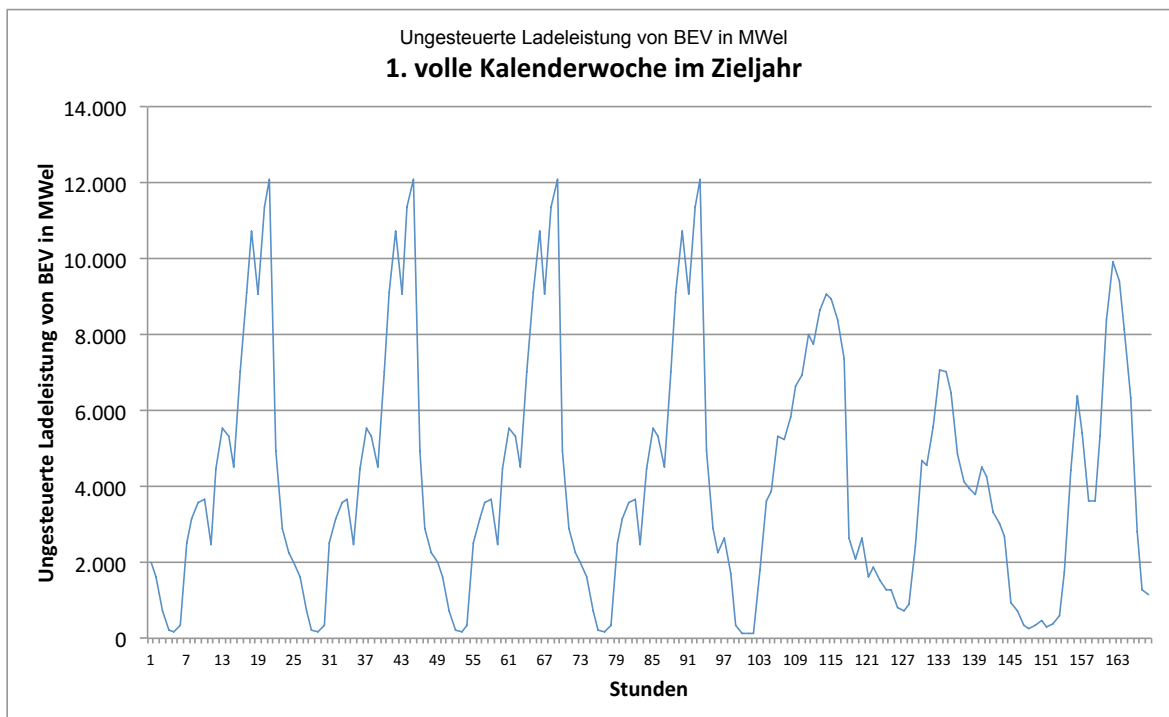


Abbildung 4-6: Exemplarisches Lastprofil für die BEV im Dekarbonisierungsszenario, erste volle Kalenderwoche (Montag bis Sonntag) im Zieljahr. Quelle: Eigene Berechnungen

Flexibilisierungsbedarfe und -optionen für E-Pkw

Die Dekarbonisierung des MIV mit Hilfe von E-Pkw und EE-Strom führt im Vergleich zu heute zu einem erheblichen zusätzlichen Stromverbrauch. In dem hier betrachteten Szenario werden allein für die E-Pkw (BEV und H₂-Hybride) insgesamt ca. 51 TWh Strom im Zieljahr benötigt. Das entspricht bezogen auf das Jahr 2018 einem Anteil von knapp 10% des gesamten inländischen Stromverbrauchs (530 TWh) und einem Anteil von rd. 31% an der Stromerzeugung aus Wind, Biomasse und PV (BMWi 2018). Der Ausbau an erneuerbaren Energien und Stromnetzen muss daher konsequent weiter vorangetrieben und noch schneller und massiver gesteigert werden als bisher geplant.

Für die jederzeitige Deckung des Stromverbrauchs der E-Pkw sind angesichts des dezentralen und fluktuierenden Erzeugungscharakters von Wind- und Solarkraftwerken zusätzliche Maßnahmen zum Ausgleich der Schwankungen und von Dunkelflauten nötig. Dazu gehören generell ein Überbau an Erzeugungskapazitäten, Optimierung des Stromnetzbetriebs, Ausbau von Stromnetzen und -speichern sowie Einsatz von Flexibilitäten. Da Dunkelflauten länger anhalten können, müssen zur Wahrung der Versorgungssicherheit bzw. zur Sicherung der Mobilität ausreichende Speicherkapazitäten geschaffen werden. Die erforderlichen Kapazitäten bei volkswirtschaftlich sinnvollen Systemkosten bietet hierzu nur die Power-to-Gas-Technologie, die Erzeugung von Wasserstoff per Elektrolyse aus erneuerbarem Strom. Der Wasserstoff kann in großen Mengen im existierenden Gasnetz gespeichert werden. Über kürzere Zeiträume können auch die Batterien der E-Pkw selbst als Flexibilitätsoption genutzt werden und damit den externen Flexibilisierungsbedarf signifikant reduzieren bzw. dazu beitragen, den verfügbaren EE-Strom besser zu nutzen.

Das mögliche Potenzial lässt sich bereits durch einen Vergleich der installierten Kapazitäten an Autobatterien und EE-Kraftwerken illustrieren. Der Bestand an E-Pkw im Zieljahr des Szenarios entspricht nominal einer installierten elektrischen Leistung von etwa 83 GW_{el}⁵. Die für den Jahresstromverbrauch der E-Pkw nominal nötige Erzeugungsleistung beträgt dagegen mindestens 21 GW_{el}⁶. Die insgesamt in den E-Pkw installierte Leistung übersteigt deutlich diejenige der Kraftwerke. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die E-Pkw zusätzlichen Randbedingungen genügen müssen und daher nicht vollständig nutzbar sind.

Dazu gehört aus Nutzersicht vor allem die mögliche Reichweite, die er mit dem Auto zurücklegen kann, d.h. eine möglichst volle Batterie. Wenn er seinen E-Pkw (EV) als Flexibilität zur Verfügung stellt, dann wird er das in der Regel an die Bedingung knüpfen, jederzeit eine ausreichend volle Batterie zu haben, die ihm eine bestimmte Reichweite sicherstellt. Was das für den Fall einer vollständigen Flexibilisierung (Be- und Entladen mittels V2G) bedeutet, zeigt die folgende Abbildung 4-7. Unterstellt man, dass wenigstens die Hälfte einer maximalen nominalen Reichweite von 250 km jederzeit gesichert sein soll, dann wird bei einem Verbrauch von 10 bis 20 kWh/100 km eine Batteriereserve von 13-25 kWh benötigt. Daraus folgt für 1 Mio. V2G-E-Pkw rein rechnerisch eine potenzielle Speicher- bzw. Regelenergiemenge von 12-25 Mio. kWh (0,12-0,25 TWh) oder eine potenzielle Erzeugungs-/Last- bzw. Regelleistung von bis zu ±12 GW_{el}.

Die Bedeutung von beiden möglichen Arten eines flexiblen Einsatzes zeigt sich durch einen Vergleich mit den heute maßgeblichen Flexibilitäten in Form von Pumpspeicherkraftwerken (PSW). Die mögliche Energiespeichermenge von 1 Mio. E-Pkw der oben genannten beispielhaften Auslegung entspricht etwa dem 1,5- bis 3-fachen des Energieinhaltes des größten deutschen PSW Goldisthal (8,5 GWh). Dagegen wäre die maximal mögliche Regelleistung der E-Pkw um etwa einen Faktor 1,7 größer als die insgesamt installierte PSW-Leistung (rd. 7 GW_{el}) in Deutschland.

⁵ Wenn man die minimale Anschlussleistung von 3,5 kW für netzgekoppelte E-Pkw am Haushaltsanschluss berücksichtigt.

⁶ Diese Leistung ergibt sich aus einem mittleren Vollaststundenwert für PV (1.000h/a), Wind-onshore (2.500h/a) und Wind-offshore (4.000h/a) in Höhe von 2.500h/a, also einem gleichverteilten EE-Kraftwerkspark.

Um die Flexibilisierungsoptionen von E-Pkw umfassend nutzen zu können, sind öffentliche und an Arbeitsplätzen verfügbare Ladestationen eine wesentliche Voraussetzung, damit der größtmögliche Teil der abgestellten Fahrzeuge auch für DSM oder V2G-Maßnahmen genutzt werden kann.

Annahme Mindestreichweite EV: 250 km

Stromverbrauch EV: 10-20 kWh_{el}/100 km



Nötige Batteriekapazität pro EV: 25-50 kWh_{el}

@Sicherheitsreserve für Autofahrer: 50%



„freie“ vehicle-to-grid Kapazität pro EV: 13-25 kWh_{el}

@ 1 Million EV in Deutschland



Potentielle Regelenenergiekapazität: 13-25 Mio. kWh_{el} (rel. wenig)

Potentielle Regelleistung: ≤12 GW_{el} (rel. hoch)

Zum Vergleich:

Installierte Leistung in Pumpspeicherkraftwerken: rd. 7 GW_{el}

Stromerzeugungskapazität von PSW Goldisthal: 8,5 Mio. kWh_{el}

Abbildung 4-7: Beispielhafte Anforderungen und Flexibilitätspotenziale für ein Vehicle-to-grid Konzept.

Wenn E-Pkw in Flottenanwendungen oder in räumlich konzentrierten Anwendungen an das Netz angeschlossen werden, dann können die bestehenden Anschlusskapazitäten des lokalen Netzes an ihre Grenzen kommen. Bei einer verstärkten V2G-Nutzung muss daher die Netzeinbindung der Fahrzeuge insbesondere auf Niederspannungsebene beachtet werden. Insbesondere ungesteuerte Aufladungen der BEV-Batterien in den Abendstunden an privaten Hausanschlüssen verstärken die ohnehin zeitgleich auftretende Lastspitze von Haushalten und sind daher zu beachten bzw. vermeiden. So kann es nach (Samweber et al. 2014) bis fast zu einer Verdopplung der privaten Spitzenlast am Abend kommen (siehe Abbildung 4-8).

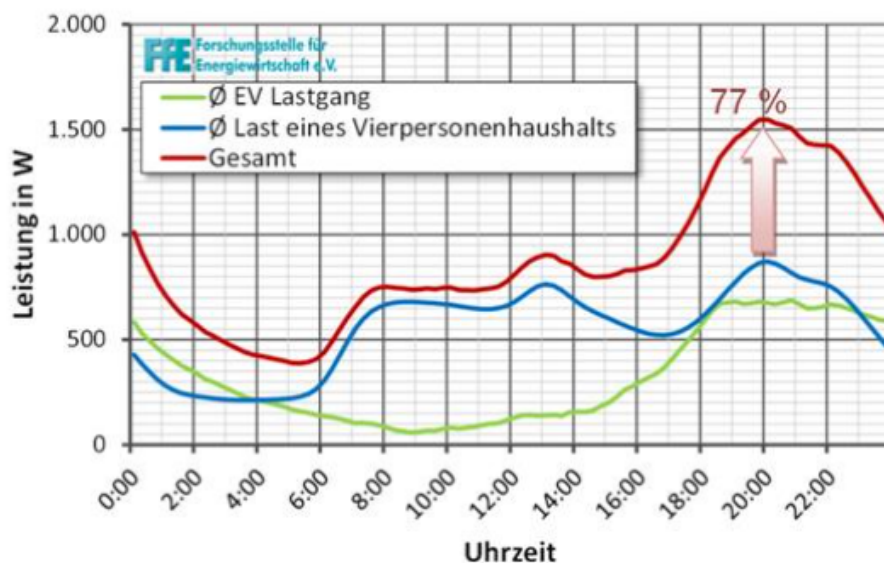


Abbildung 4-8: Typischer Lastgang eines Vierpersonenhaushalts mit Elektrofahrzeug am Beispiel der Modellregion München. Quelle: Samweber et al. 2014, S. 105

Umgekehrt können bereits relativ wenige, netzgekoppelte Elektro-Pkw auch zur lokalen Verbesserung der Netz- bzw. Spannungsqualität herangezogen werden, in dem sie bei Bedarf als Senke und als Quelle zu- oder abgeschaltet werden. Sie können auf diese Weise auch direkt zum lokalen Lastausgleich beitragen und damit die Belastung der vorgelagerten Netzebenen sowie den notwendigen Einsatz von Regelreserven reduzieren helfen. Dies wird besonders vor dem Hintergrund steigender Anteile von EE- bzw. EEG-Anlagen im Niederspannungs- und Mittelspannungsnetz und damit gegebenenfalls steigender Bedeutung von Erzeugungsmanagement in diesen Netzebenen relevant.

Dies gilt perspektivisch besonders für das Zieljahr des Szenarios, in dem es im Vergleich zu heute viel größere EE-Leistungen und insbesondere PV-Anlagen im Niederspannungsnetz gibt. Hier sind verschiedene Wechselwirkungen zwischen dezentraler Erzeugung, Speicherung und Bedarfsdeckung möglich. Dazu werden in Samweber et al. (2015) Vergleiche zum möglichen PV-Eigenstromverbrauch mit und ohne E-Pkw bzw. stationäre Haushaltsspeicher durchgeführt. Diese zeigen, dass sich die mögliche Eigendeckung durch ein BEV um rd. 4-5 Prozentpunkte auf rd. 27% verringert, mit Hausspeicher dagegen bis auf rd. 48% gesteigert werden kann. Bezogen auf ein beispielhaftes lokales Stromnetz in einem Wohngebiet kann der gesamte PV-Strom ohne E-Pkw und Hausspeicher bis zu 78% direkt verbraucht werden und mit beiden Systemen sogar bis zu 94%. Bei einer solchen lokalen Optimierung ist allerdings parallel darauf zu achten, dass sie einer überregionalen Optimierung nicht entgegenwirkt.

Abschließend ist generell festzuhalten, dass die Dekarbonisierung des Verkehrssektors in Zukunft sehr viel stärker mit dem Stromsystem wechselwirkt. Dabei sind bezogen auf eine Flexibilisierung die trade-offs zwischen Effizienz und Flexibilitätsgrad zu beachten (siehe Abbildung 4-9). Die direkte Elektrifizierung z.B. mittels BEV, H2-Hybride als auch Oberleitungs-Fahrzeugen ist aufgrund geringerer Umwandlungsverluste und höherer Antriebswirkungsgrade deutlich effizienter als Systeme und Antriebe, die strombasierte (PtX-)Kraftstoffe nutzen. Dagegen bieten letztere in der Regel einen größeren Umfang und Dauer für die Erbringung von Flexibilitäten. Ein Optimum wird daher einen geeigneten Mix aus allen Strategien beinhalten.

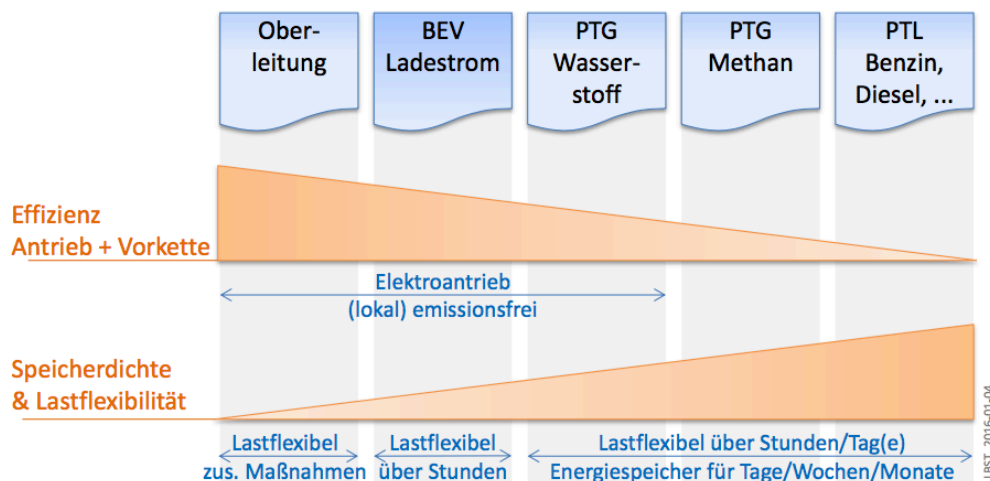


Abbildung 4-9: Illustrative Darstellung der trade-offs zwischen Effizienz und Systemdienlichkeit verschiedener Kraftstoffe/Antriebe. Quelle: Bünge et al. 2017

5 Literaturverzeichnis

- Agora Verkehrswende 2017. *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende*. Berlin: Agora Verkehrswende.
- Atabani, A.E.; Badruddin, I. A.; Mekhilef, S.; Silitonga, A.S. 2011. A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pp. 4586–4610
- Bergk, Fabian; Knörr, Christiane; Lamprecht, Udo 2017. *Klimaschutz im Verkehr. Neuer Handlungsbedarf nach dem Pariser Klimaschutzabkommen*. UBA Texte 45/2017. Dessau: Umweltbundesamt
- BMU 2010. *Leitstudie 2010 – Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*.
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf
- BMU 2016: *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Berlin: Zarbock
- BMWi 2018. *Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2017*. Abgerufen von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) website: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/erneuerbare-energien-in-zahlen-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=10
- Bünger, Ulrich; Michalski, Jan; Schmidt, Patrick; Weindorf, Werner 2017. *Wasserstoff - Schlüsselement von Power-to-X*. In: Töpler, Johannes; Lehmann, Jochen (Hrsg.) 2017: *Wasserstoff und Brennstoffzelle - Technologien und Marktperspektiven*, S. 327-368. Berlin: Springer Vieweg
- CONCAWE, EUCAR & JRC 2008. *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European Context*. TANK-to-WHEELS Report; Version 3, October 2008. Brussels
- Damert, Matthias; Rudolph, Frederic 2018. *Policy options for a decarbonisation of passenger cars in the EU. Recommendations based on a literature review*. Wuppertal Paper Nr. 193. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- DIW 2017. *Verkehr in Zahlen 2017/2018*. Hamburg: DVV Media Group
- DLR / Ifeu / LBST / DBFZ 2016. *Verkehrsverlagerungspotenzial auf den Schienengüterverkehr in Deutschland. Endbericht*. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Erstellt von A. Lobig, G. Liedtke, A. Lischke, A. Wolfermann (DLR), W. Knörr (Ifeu). Berlin / Heidelberg.
- Engel, T. 2005. *Das Elektrofahrzeug als Regelenergiekraftwerk des Solarzeitalters*. Abgerufen von <https://www.dgs.de/fileadmin/files/FASM/Engel-V2G-Regelenergiekraftwerk.pdf>
- European Parliament 2019. *Briefing: CO₂ emission standards for heavy-duty vehicles*.
http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/628268/EPRS_BRI%282018%29628268_EN.pdf

- Gerbert, Philipp et al. 2018. *Klimapfade für Deutschland*. BCG/Prognos: Berlin/München/Hamburg/Basel
- Hans Böckler Stiftung 2015. *Branchenanalyse: Zukunft des ÖPNV - Entwicklungstendenzen und Chancen*. Düsseldorf.
- Hülsmann, Friederike; Mottschall, Moritz; Hacker, Florian 2014: *Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050*. Öko-Institut Working Paper 3/2014
- Niggemeier, M.; Linkenheil, C.; Brinkhaus, M.; Huneke, F. 2019. *Erneuerbar in allen Sektoren. Sektoren koppeln mit P2G*. Berlin: Energy Brainpool
- IEA 2017. *Energy Technology Perspectives 2017*. Paris: OECD/IEA
- infas, DLR 2010. *Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends*, Bonn und Berlin
- IPCC 2018. *Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers*. Switzerland: IPCC
- Jochem, Eberhard 1991. *Reducing CO₂ emissions – the West German plan*. In: *Energy Policy Volume 19, Issue 2, March 1991*, S. 119-126
- Lah, Oliver; Lah, Barbara 2019. *Opportunities for synergies and cobenefits*. In: *Sustainable urban mobility pathways: policies, institutions, and coalitions for low carbon transportation in emerging countries*, S. 81-98. Amsterdam: Elsevier
- Rudolph, Frederic; Koska, Thorsten; Schneider, Clemens (Wuppertal Institut) 2017. *Verkehrswende für Deutschland: Der Weg zu CO₂-freier Mobilität bis 2035*. Hamburg: Greenpeace e.V.
- Rudolph, Frederic 2019. *Der Beitrag von synthetischen Kraftstoffen zur Verkehrswende: Optionen und Prioritäten*. Hamburg: Greenpeace
- Rudolph, Frederic; Werland, Stefan 2019. *Public procurement of sustainable urban mobility measures. Topic Guide*. Brussels: eltis
- Samweber, Florian; Nobis, Philipp; Wachinger, Kristin; Köppl, Simon; Gallet, Marc; Fischhaber, Sebastian; Staudacher, Thomas 2014. *Sun2Car@GAP. Endbericht*. München: FfE
- Samweber, Florian; Fischhaber, Sebastian; Nobis, Philipp 2015. *Electric Mobility as a Functional Energy Storage in Comparison to On-Site Storage Systems for Grid Integration*. *Energy Procedia*, 73, 94–102.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.572>
- Sterner, Michael et al. (FENES / OTH Regensburg) 2015. *Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für das Gelingen der Energiewende*. Hamburg: Greenpeace Energy eG
- VDV 2016. *Zukunftsfähige ÖPNV-Finanzierung. Fortführung des Konsenses zur politischen Verantwortung für Busse und Bahnen. Positionspapier*, April 2016. Köln: VDV

Viebahn, Peter; Horst, Juri; Scholz, Alexander; Zelt, Ole 2018. Technologiebericht 4.4. Verfahren der CO₂-Abtrennung aus Faulgasen und Umgebungsluft innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. Wuppertal. Wuppertal Institut

*Website BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur):
<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/klimamassnahmen.html>*

*Website KBA (Kraftfahrtbundesamt):
https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/fahrzeuge_node.html;jsessionid=EDCB1D5D20EDC017BD6C6D32C56376A8.live11294*

Zimmer, Wiebke et al. (Öko-Institut, DLR, ifeu, INFRAS) 2016. Renewbility III: Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Berlin: BMUB